MAREA NEGRA SOBRE GALICIA: REPERCUSIONES BIOLOGICAS

INVESTIGACION y CIENCIA

FEBRERO 2003
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA ANTARTIDA, SIN HIELO

Enfermedad de Huntington

Los insectos: un éxito de la evolución

Genética e historia de las poblaciones del norte de Africa y la península Ibérica

Un universo en explosión

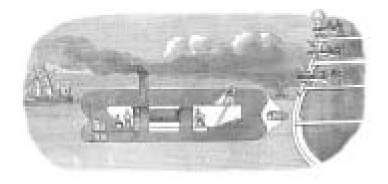
Orden en el caos de Pollock



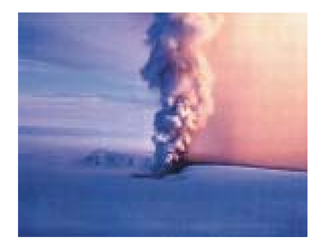

Febrero de 2003 Número 317

SECCIONES

5
HACE...
50, 100 y 150 años.



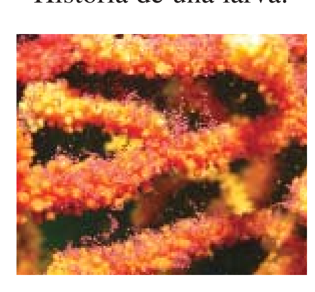
6
APUNTES

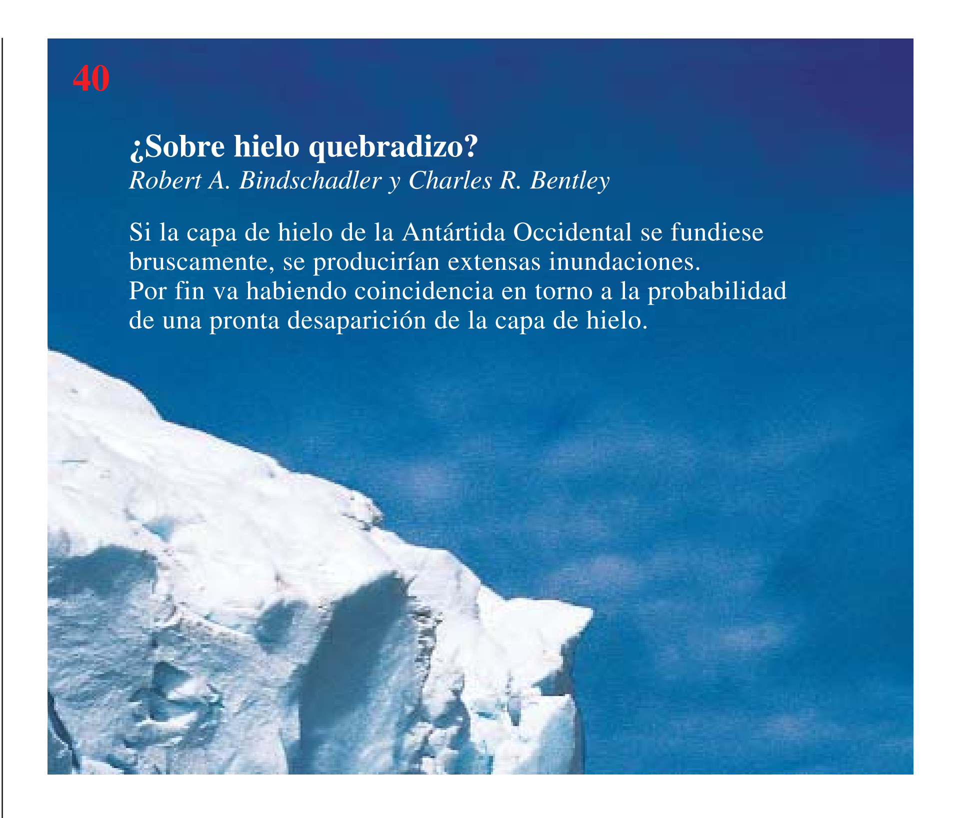


32
CIENCIA Y SOCIEDAD
Marea negra sobre Galicia, repercusiones biológicas...
Los cannabinoides, ¿agentes antitumorales?...
El brezal mediterráneo o herriza, en el Parque Natural Los Alcornocales.



38
DE CERCA
Historia de una larva.





40
¿Sobre hielo quebradizo?
Robert A. Bindschadler y Charles R. Bentley

Si la capa de hielo de la Antártida Occidental se fundiese bruscamente, se producirían extensas inundaciones. Por fin va habiendo coincidencia en torno a la probabilidad de una pronta desaparición de la capa de hielo.

Los insectos: un éxito de la evolución
André Nel

Los insectos han conocido tres grandes explosiones evolutivas que condujeron, consecutivamente, al desarrollo de las alas, la metamorfosis y la vida en sociedad. Representan el 85 por ciento de la diversidad animal.

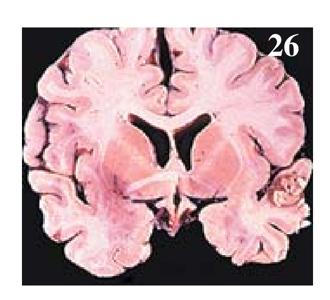

8

18
Las explosiones más brillantes del universo
Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard

Cada una de las devastadoras catástrofes cósmicas que se nos manifiestan como erupciones de rayos gamma anuncia el nacimiento de un agujero negro.

Enfermedad de Huntington
Elena Cattaneo, Dorotea Rigamonti y Chiara Zuccato

Aunque hace diez años que se aisló el gen responsable de la enfermedad de Huntington, continúa la búsqueda de sus mecanismos destructores.


26

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

48



Incidencia de la dieta en la hominización

William R. Leonard

Los cambios operados en el régimen alimentario han constituido una fuerza motriz de la evolución humana.

58

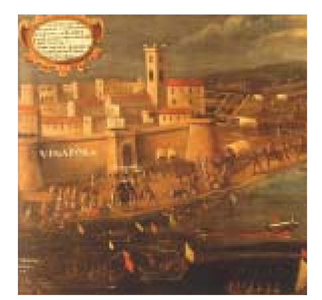
Ibn Sahl, inventor de la ley de la refracción de la luz

Brahim Guizal y John Dudley

Un manuscrito revela que Ibn Sahl, matemático árabe, había descubierto la “ley de Descartes” ya en el siglo X.



62



Genética e historia de las poblaciones del norte de Africa y la península Ibérica

E. Bosch, F. Calafell, S. Plaza, A. Pérez-Lezaun, D. Comas, Jaume Bertranpetit

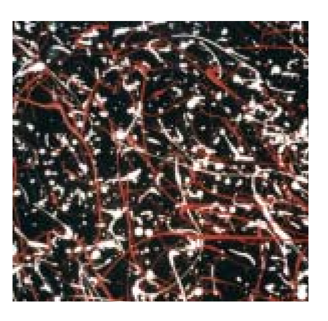
El análisis de la diversidad genética entre poblaciones ha revelado que los amplios intercambios culturales producidos entre el Magreb y la península Ibérica no se corresponden con los intercambios de poblaciones.

70

Orden en el caos de Pollock

Richard P. Taylor

Análisis por ordenador sugieren que el atractivo de las pinturas de Jackson Pollock nace de su complejidad fractal.



76



Microesferas, átomos fotónicos y la física de la nada

Stephen Arnold

La luz puede quedar atrapada dentro de diminutas esferas transparentes. Las sorprendentes propiedades que adquiere entonces quizá conviertan la “fotónica de microesferas” en una nueva rama de la técnica.

SECCIONES

84

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

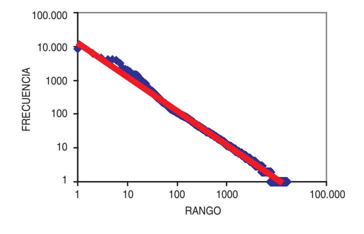
Reflexiones sobre la reflexión, por J.-M. Courty y E. Kierlik



86

JUEGOS MATEMÁTICOS

Números y palabras, por Juan M. R. Parrondo



88

IDEAS APLICADAS

Impresión por chorro de tinta por Mark Fischetti

90

LIBROS

Filosofía natural... Economía y política en Bolivia.



96

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Contra las filtraciones, por Dennis E. Shasha



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
REVIEWS EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Xavier Bellés: *Los insectos: un éxito de la evolución*; M.ª Rosa Zapatero: *Las explosiones más brillantes del universo*; Esteban Santiago: *Enfermedad de Huntington*; Manuel Puigcerver: *¿Sobre hielo quebradizo?*; Carlos Lorenzo: *Incidencia de la dieta en la hominización*; Luis Bou: *Ibn Sahl, inventor de la ley de la refracción de la luz*, *Orden en el caos de Pollock* y *Aventuras problemáticas*; Julio A. Alonso: *Microesferas, átomos fotónicos y la física de la nada*; J. Vilardell: *Hace...*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*



Portada: Gary Buss *GettyImages*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

FÓSIL VIVIENTE. «En el océano Indico, a la altura de Madagascar, unos pescadores capturaron el mes pasado en sus redes un pez de casi 50 kilos de peso y metro y medio de largo que los evolucionistas puntualmente acogieron entusiasmados como ‘el descubrimiento zoológico más importante del siglo’. J. L. B. Smith, ictiólogo sudafricano, voló 3000 millas en un avión del gobierno para llegar hasta el pez a tiempo de preservarlo. A su llegada, y al encontrarlo oliendo no poco pero mayormente intacto, se derrumbó y echó a llorar. El objeto de tal emoción era un celacanto, el tipo más primitivo de pez espinoso. Hasta hace pocos años se creía que se había extinguido hace 75 millones de años, pero en 1938 un jabeguero sudafricano sacó uno del agua. Cuando Smith pudo poner en él sus manos ya sólo quedaban la piel y el esqueleto. Desde entonces no ha cejado en la búsqueda de otro ejemplar.»

ANTES DE WATSON Y CRICK. «Una molécula intacta de ácido desoxirribonucleico, abreviadamente ADN, es una estructura muy larga y complicada: puede contener hasta 3000 moléculas de un azúcar de cinco carbonos. El ADN es un ejemplo de lo que hoy se llama un polímero largo. Un ejemplo conocido de polímero largo es el nailon. Lo característico de un polímero largo es que un grupo químico está encadenado repetidamente formando una gran estructura. En el nailon el grupo es relativamente simple, y sólo hay un tipo de submolécula. En el ADN los grupos son mucho más complejos. Averiguar cómo se polimerizan para formar una molécula gigante es una tarea formidable que aún no se ha llevado a cabo. Cuando así sea, sabremos mejor cómo actúa el ADN en los cromosomas. —Alfred Ezra Mirsky»

...cien años

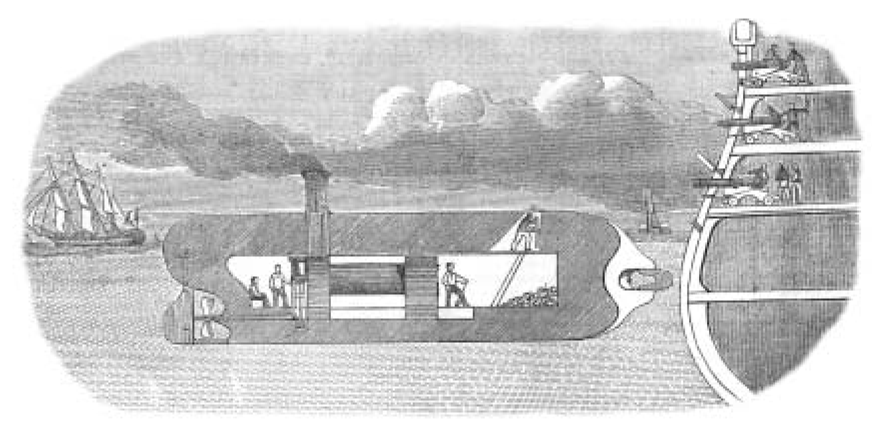
COCHES MODERNOS. «Las tres cuartas partes de los vehículos exhibidos en la feria del automóvil de Nueva York eran del tipo de cilindro de combustión interna; el resto, carruajes de vapor. Los precios variaban entre 500 y 8000 dólares. La completa ausencia de monstruos de carreras fue una señal de que se tiende a las construcciones cómodas, económicas y eficaces, de velocidades moderadas, apropiadas para el turismo. Si recorrer en coche el país no se pone de moda la próxima temporada, nunca se pondrá.»

LÁMPARA DE VAPOR DE MERCURIO. «El señor George Westinghouse, durante su reciente estancia en Londres, mostró la nueva lámpara inventada por el señor Peter Cooper Hewitt. El artefacto consiste en un tubo de vidrio relleno de vapor de mercurio. Atravesado por una corriente continua, el vapor que llena el tubo se pone incandescente y despide una luz estable de tono blancoazulado. A causa de la notable resistencia del electrodo negativo al flujo inicial de la corriente, es necesario emplear una gran tensión eléctrica para cebar la lámpara. La luz emitida por el vapor incandescente carece por completo de rayos rojos, pero, habida cuenta de su precio, tan bajo que maravilla, la luz de Cooper-Hewitt debería resultar utilísima, sin añadirle otra luz que la rectifique, para la iluminación de fábricas, jardines, etc., donde la discriminación de colores no es importante. Otro campo prometedor para esta nueva luz es la fotografía.»

...ciento cincuenta años

EL INTERIOR DE LA TIERRA. «Según el profesor Silliman, del Colegio de Yale, ‘en la Tierra el calor aumenta en un grado centígrado por cada 30 metros de descenso; si bajáramos tres mil metros, hallaríamos agua hirviendo. ¿Quema cuanto hay bajo nuestros pies? Disponemos de pruebas sólidas a favor de esa teoría. Véanse los manantiales calientes de Bath, en Inglaterra. Tanto más notables cuanto que no hay volcanes en las Islas Británicas. Sabemos que desde los tiempos de los romanos esas aguas no han cesado de manar en abundancia.’»

LLAMANDO AL CAPITÁN NEMO. «Nuestro grabado es una vista de una torpedera de hélice parcialmente sumergida, propuesta por James Nasmyth, de Patricoft (Inglaterra), para destruir los mayores buques de una flota invasora. La entera masa de esta embarcación (mortero y todo) entra en liza. El gran mortero de latón con la granada estalla en el instante en que se aplasta contra el costado de la embarcación enemiga. Debemos decir que ahora Inglaterra parece temerosa de confiar en sus muros de madera y en vez de asustar a sus enemigos vigilando las costas, como solía, se toma pero que muy en serio su defensa mediante bichos acuáticos como éste del señor Nasmyth.»



DUDOSA DEFENSA COSTERA: Fragata mortero submarina, 1853

APUNTES

OCEANOGRAFIA

Efectos remotos de un vertido

Para calibrar los efectos a largo plazo de los vertidos del *Prestige*, podemos empezar por mirar a lo sucedido con otras catástrofes. En 1969 se produjo el desastre del *Florida* en las costas de Massachusetts. El equipo encabezado por Christopher M. Reddy, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, extrajeron en 2000 un testigo de 36 centímetros de longitud en West Falmouth. De acuerdo con sus resultados, persiste todavía la contaminación por petróleo, pese a haber pasado más de treinta años. Los lugares más afectados corresponden a recovecos y recodos. Enterrados en los sedimentos, y a resguardo de la acción biodegradante de los microorganismos, sigue todavía allí cierta cantidad de componentes pesados del petróleo.



BIOLOGIA

Regeneración del corazón



La cicatrización impide que el corazón humano se repare a sí mismo. No ocurre así con un pez habitual de los acuarios. Kenneth D. Poss, Lindsay G. Wilson y Mark T. Keating, del Instituto Médico Howard Hughes, han observado la regeneración natural del corazón de los peces cebra. Tras extirpar a un adulto una quinta parte de la víscera, recuperaban, pasados dos meses, su tamaño ordinario. Latían con absoluta normalidad. La observación microscópica nos reveló que, al principio, la herida se cubría de tejido cicatricial. Luego, sin solución de continuidad, proseguía el proceso curativo, favorecido por la proliferación de células musculares. En el futuro, la investigación de los genes que promueven la regeneración en los peces podría conducir a métodos de restañar sin cicatrices el corazón humano, pues sépase que compartimos muchos de ellos. —*Sarah Simpson*

En el círculo se ve el ADN (verde) *que crea las señales desencadenantes de la regeneración de miocitos* (rojo)

GEOQUIMICA

Fuego y hielo

¿Hielo para encender fuego? Según las conclusiones a que ha llegado el grupo de John J. Maclennan, del Instituto Geofísico de París, los antiguos volcanes de Islandia retomaron una repentina actividad cuando las capas de hielo que cubrían la isla se derritieron súbitamente hará unos 10.000 años. Medían las capas más de un kilómetro de espesor. El suelo, libre del peso del hielo, ascendió y alivió la presión ejercida sobre el manto subyacente de roca, caliente. El análisis de grandes coladas de lava de ese período ofrece la primera prueba sólida del siguiente fenómeno: la disminución de la presión promueve la fusión de las rocas del manto, con su ascensión consiguiente a la superficie. Las coladas —cuya composición indica que proceden del manto, no de la corteza— descubren que las erupciones se centuplicaron durante los 1500 años subsiguientes a la desglaciación.

—*Sarah Simpson*



Esta erupción subglacial se produjo en Grimsvoetn, Islandia

MATT COLLINS (*arriba*); MARK SMITH *Photo Researchers, Inc.* (*fotografía*), KENNETH D. POSS, LINDSAY G. WILSON Y MARK T KEATING (*inserto*); HRAFNSSON GISLI EGILL *Corbis Sigma* (*abajo*)

ARQUEOLOGIA

Mitra en Renania

Durante los siglos II y III, el cristianismo compitió en el Imperio Romano con el mitraísmo. Esta religión de origen oriental se extendió por todo Occidente y llegó a Germania. Aquí se han encontrado decenas de lugares de culto, sobre todo en el valle del Rhin o en sus proximidades. Los arqueólogos acaban de identificar uno en Güglingen, entre Karlsruhe y Heilbronn. Bajo la dirección de Andrea Neth, del Servicio Regional de Monumentos Históricos de Bade, se han sacado a luz los restos de un habitáculo que presenta las características de los mitreos. Perteneció a una pequeña aglomeración rural atravesada por una vía romana. La destruyó el fuego. En la capa de 30 centímetros de espesor que cubría las ruinas se han encontrado utensilios de los alamanes, prueba de que la vida religiosa mitraica cesó cuando ese pueblo se instaló en la región.
El culto a Mitra nació en Persia. Unos 2000 años separan el Mitra iraní del que irrumpió en el Imperio Romano en el siglo I antes de nuestra era. De acuerdo con la leyenda, este dios solar, protector de la verdad, emergió de las rocas. Por eso, sus adeptos acomodaban sus santuarios en cavernas.



Lugar de culto ligado a Mitra, del siglo II o III. Se ve a Mitra armado con un cuchillo (izquierda) *y un gorro frigio* (derecha)

GENETICA

De hombres y ratones



A nadie se le escapa la importancia decisiva, para el progreso de la biología, de la secuenciación del genoma del ratón (*Mus musculus*). Inseparable de la historia humana, sobre ese animal de experimentación se han asentado cuantos avances biomédicos ha conocido la ciencia de los últimos cien años. Ahora podemos proceder con mayor seguridad cuantitativa. Adelantemos algunas cifras. El genoma del ratón es un 14 por ciento menor que el humano. Más del 90 por ciento del genoma humano y del genoma del ratón se subdivide en regiones sinténicas (genes con características distintas en el mismo cromosoma), lo que nos indica que ambas especies presentan secuencias génicas que se han mantenido en el curso de la evolución. Por lo que concierne a los nucleótidos, cerca del 40 por ciento del genoma humano puede superponerse al del múrido. Por fin, un 80 por ciento de los genes del ratón ofrecen su equivalente correspondiente en el genoma humano.

FISICA, FILOSOFIA Y OPINION PUBLICA

El caso de los hermanos Bogdanov

La Universidad de Borgoña aprobó en 2000 dos tesis doctorales de física matemática, sobre gravedad cuántica. Sus autores, los hermanos Bogdanov, han desarrollado lo allí expuesto en varias revistas. Pero la revisión posterior del trabajo ha depreciado su valor, reputándolo auténticos galimatías. El caso ha tenido mucha repercusión. La principal razón es que parece una inversión del caso Sokal. Este especialista en la gravedad cuántica presentó hace años en una revista de sociología los conceptos de la física teórica como si fuesen aplicables a la sociología y a la antropología; se trataba de poner de manifiesto el uso impropio, por desconocimiento palmario, de términos altisonantes con el afán de conferir seriedad a una texto carente de verdadero soporte científico. Pero las tesis de los Bogdanov han dado pie a algunos para avisar contra el abuso de ciertos artículos de física teórica, salpicados de terminologías extrañas a falta de referencias fiables.

Deconstruction, G_2 Holonomy, and Doublet-Triplet Splitting

within the KMS strip, the existence of an "extended" (holomorphic) automorphism "group of evolution", which depends, in the classification of factors [12], on a "type III

La mera apariencia de galimatías o de palabrería a la moda no basta para desechar un artículo. De estas palabras, unas son de los Bogdanov, otras de Edward Witten, medalla Fields

A. NETH, *LDA* Bade-Wurtemberg (*arriba*)

Los insectos: un éxito de la evolución

Los insectos han conocido tres grandes explosiones evolutivas que condujeron, consecutivamente, al desarrollo de las alas, la metamorfosis y la vida en sociedad. Representan el 85 por ciento de la diversidad animal

André Nel

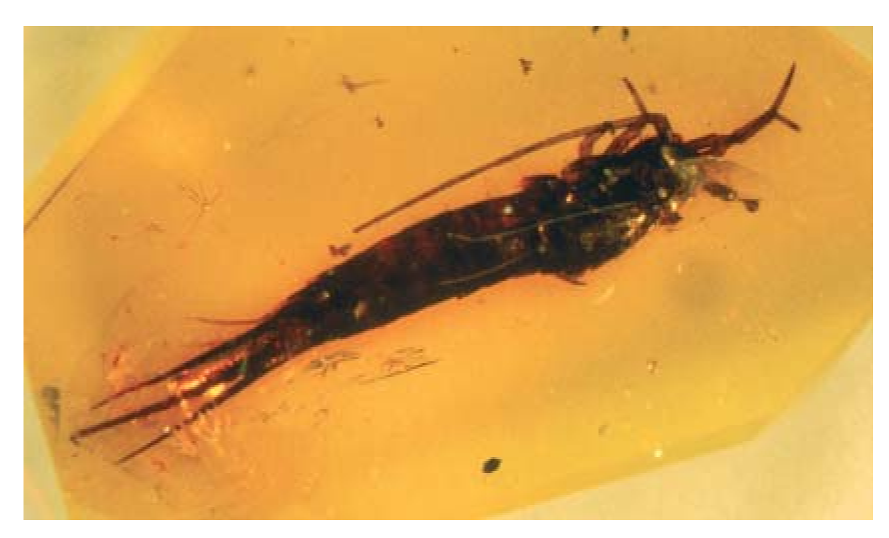
DELPHINE BAILLY



A mediados del Cretácico, hace 96 millones de años, un miembro de la familia *Aeschnidiidae* patrulla por la superficie de un río. Este pariente próximo de las libélulas actuales es uno de los últimos representantes de su grupo, típico del Jurásico. Sus antepasados aparecieron en los bosques de coníferas del Jurásico superior, y se adornaron con alas rayadas, lo que les permitió pasar inadvertidos en el claroscuro del sotobosque. Sin embargo, esa ventaja acabó por perder importancia. Gracias a sus flores chillonas y olorosas, y a sus semillas rodeadas de un fruto, unos vegetales nuevos invadieron la Tierra. Con ellos, aparecieron millones de nuevas especies de insectos, volando de flor en flor, organizándose en sociedades, escalando por las largas hojas de los nuevos árboles, identificándose con ellas... Nuestro *Aeschnidiidae* hace una pausa en la hoja de una encina, pero no repara en el cuerpo en forma de ramilla de uno de los nuevos insectos. Voraz, la mantis religiosa proyecta sus poderosas patas anteriores sobre el *Aeschnidiidae* antes de empezar a degustarlo...

Los insectos fósiles están poco estudiados. En todo el mundo, un centenar escaso de in-

MUSEO NACIONAL DE HISTORIA NATURAL



1. EL PECECILLO DE PLATA, muy frecuente hoy en día, es una forma estable. Se han encontrado fósiles de una especie similar de más de 400 millones de años de antigüedad. Este ejemplar que nos ha llegado aprisionado en ámbar del Báltico tiene 40 millones de años.

vestigadores se consagra a la paleoentomología. Por cada entomólogo que ha de habérselas con millones de especies de insectos actuales y fósiles, hay unos 20 paleontólogos de vertebrados que estudian unos pocos miles de especies de dinosaurios o de mamíferos.

Demostrando un éxito evolutivo sin parangón, la diversidad de los insectos deriva de una historia evolutiva larga y compleja. Los paleoentomólogos han establecido ya un primer guión. Han descubierto que la evolución de los insectos está marcada por tres hitos, tres “explosiones evolutivas” en el curso de las cuales ciertos grupos de especies se diversificaron de forma extraordinariamente rápida. En cada ocasión, la pronta diversificación de un grupo de especies se desencadenó a partir de una “invención” evolutiva, de una modificación del ambiente o de ambas.

Esos períodos clave de la historia evolutiva de los insectos son el Carbonífero inferior, con la “invención” del ala y del vuelo, el Permo-Triásico, con la del estadio ninfal, y el Cretácico, con la “puesta a punto” de la polinización por los insectos y el advenimiento de los insectos sociales. A partir de cada una de esas explosiones evolutivas, las especies que se diversifican descienden de las que resultaron favorecidas por la explosión precedente. Sin embargo, ciertas especies “arcaicas” llegan también a adaptarse; por eso, entre los insectos se cuentan algunas de las especies más antiguas de la Tierra.

¿Cómo podría ignorarse a los insectos en la gran empresa investigadora que paleontólogos, paleoclimatólogos y geólogos llevan a cabo para reconstruir el pasado? Inagotable fuente de información, esta clase representa, por sí sola, el 55 por ciento de la biodiversidad actual conocida, y el 85 por ciento de la diversidad animal. Los insectos actuales comprenderían entre 3 y 30 millones de especies vivas, de las cuales se han descrito sólo 900.000.

Esos animales minúsculos de seis patas se han adaptado a todos los medios, terrestres o acuáticos, y a todos los climas, polares, templados, tropicales o desérticos. Tal omnipresencia los convierte en óptimos indicadores del pasado, pues cada especie está asociada a un clima y a un medio específico, donde halla los recursos necesarios para su metabolismo. Tal mosca que vivió hace 50 millones de años y, sin embargo, presenta una morfología muy similar a la de una especie moderna, tenía probablemente una biología similar a la de su descendiente actual y debió vivir en un clima parecido.

La investigación paleontológica

Los insectos ofrecen también el interés de su antigüedad. Descienden de los primeros animales que conquistaron los ambientes terrestres; son así los únicos “testigos” vivos de un lejano pasado. Aparte de ciertos insectos, ¿qué organismo terrestre actual se parece a su antepasado de hace 200 millones de años? Tamaña estabilidad taxonómica constituye una bendición para los paleontólogos, ya que colma las lagunas documentales debidas a la ausencia de fósiles de ciertas épocas. Así, los insectos revelan semejanzas climáticas entre épocas distantes y proporcionan informaciones preciosas para la reconstrucción de la evolución geográfica de las especies. Pese a esas ventajas, los paleontólogos investigan poco los fósiles de insectos. ¿Por qué?

Sin duda, porque los creían ausentes del registro fósil. La verdad es que aparecen en numerosos sedimentos. En Francia, pueden contarse más de un centenar de yacimientos de fósiles de insectos. En Siberia hay muchos más, poco o mal explorados todavía. Los yacimientos de ámbar son numerosos (Líbano, Siberia, Estados Unidos, España, Francia). Además, los insectos han fosilizado a menudo en antiguos lagos de cráteres, como el paleolago miocénico de Murat, en la región de Cantal. Se les halla también en sedimentos fluviales, como los del

ERA PRIMARIA

CAMBRICO	ORDOVICICO	SILURICO	DEVONICO	CARBONIFERO	PER
	595 MA	443 MA	417 MA	354 MA	290 MA

El autor

ANDRE NEL, maestro de conferencias en el Museo Nacional de Historia Natural de París, es el único paleoentomólogo francés profesional.

Cretácico inferior del sur de Inglaterra, donde ciertos niveles están cubiertos de miles de alas de escarabajos y de libélulas. Se les encuentra en depósitos de origen marino, como las diatomitas de Mo-Clay, en Dinamarca, o, también, en las canteras de caliza litográfica de Baviera. De estas últimas no procede sólo el famoso *Archaeopteryx* (la más antigua ave conocida), sino también los antepasados de las familias modernas de libélulas. Se han encontrado insectos en los nódulos pérmicos del centro de Francia o de Madagascar, en los rellenos fosforíticos terciarios de las cuevas de Quercy o de Kenia, o, transformados en sulfuro de hierro, en las margas del Eoceno de *London Clay*, en Inglaterra. Se han recuperado incluso en sal gema o en yeso. Aunque no todos los yacimientos fósiles son insectíferos, los que sí lo son aportan centenares de especies nuevas.

La historia evolutiva de los insectos empieza probablemente en el Ordovícico-Silúrico, hace 450 millones de años, cuando las primeras formas de vida ganan la tierra firme. La atmósfera ha llegado a adquirir densidad suficiente para filtrar la radiación ultravioleta. Las primeras plantas se adaptan al medio terrestre, probablemente en los pantanos. Los primeros animales que colonizan esos medios son artrópodos. Este término, que designa a los animales con patas articuladas, incluye crustáceos, trilobites, miriápodos (ciempiés y milpiés), arácnidos e insectos.

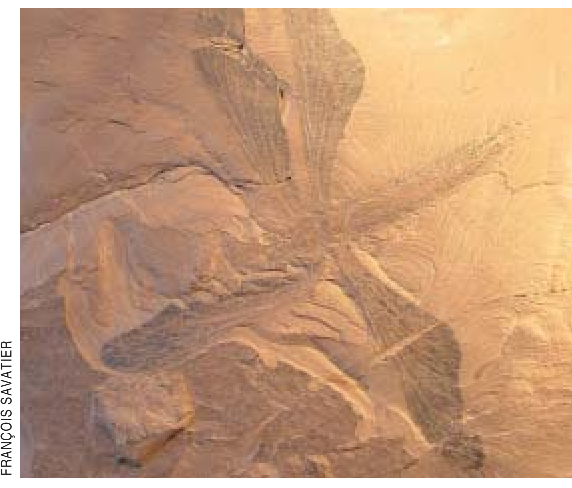
Podemos observar trazas fosilizadas de los primeros artrópodos terrestres en arcillas de Escocia, que datan de esa época. Veinte millones de años después, esos primeros artrópodos ya se han diversificado en una fauna muy compleja que comprende crustáceos terrestres (de los cuales desciende la actual cochinilla de la humedad), escorpiones acuáticos y terrestres, arañas y miriápodos, carnívoros o no. Los primeros artrópodos terrestres comprenden especies depredadoras (escorpiones, arañas, etc.), numerosos detritívoros (que comen plantas muertas) y fitófagos (que se alimentan de plantas vivas). Estos últimos dejaron excrementos microscópicos fosilizados con los tallos vegetales procedentes de la misma época; se trata de bolitas de una décima de milímetro de diámetro parecidas a las que dejan algunos insectos fitófagos actuales.

La larga historia evolutiva de los insectos

¿Cuándo se diferenciaron los primeros insectos? No lo sabemos. ¿Cómo aparecieron? ¿Son parientes de los miriápodos, esos animales con tantas patas y con tráqueas respiratorias? ¿O surgieron de los crustáceos? Los partidarios de la tesis de los miriápodos y los partidarios de la tesis de los crustáceos vienen enfrentándose desde hace un siglo.

Numerosos argumentos extraídos de la morfología apoyan un parentesco con los miriápodos. Sin embargo, esas especializaciones compartidas por miriápodos e insectos quizá se desarrollaron independientemente, en respuesta a presiones idénticas relacionadas con la vida terrestre. Por otro lado, los crustáceos y los insectos comparten también numerosos caracteres, parentesco que ha recibido un fuerte respaldo con el hallazgo de la similitud en los genes implicados en el desarrollo en ambos grupos (los genes que gobiernan la morfología, denominados *homeobox*).





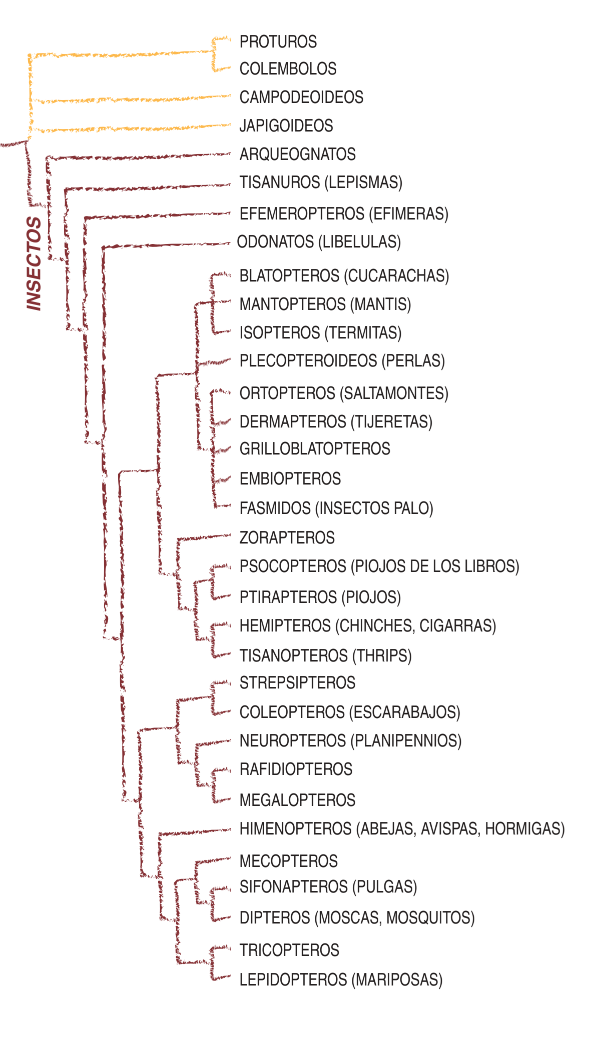
2. DE ESTOS DOS INSECTOS, la cucaracha (*arriba*), hallada en Commentry, procede del Carbonífero superior; tiene unos 300 millones de años. El megasecóptero (*abajo*), una suerte de libélula arcaica, fosilizó en una calcárea carbonatada típica del Carbonífero.

En cualquier caso, los insectos más antiguos datan del Devónico (hace entre 380 y 400 millones de años). En esa época viven en los pantanos en un clima cálido y húmedo. Se han hallado sus fósiles en los yacimientos de Rhynie (en Escocia) y de Gilboa (cerca de Nueva York). ¿A qué se parecen? Probablemente a los colémbolos, hexápodos similares a los insectos, aunque dotados de un sistema de visión primitivo, y a los arqueognatos, pequeños animales sin alas que probablemente vivían, como la mayor parte de sus descendientes actua-

ERA SECUNDARIA — ERA TERCIARIA

MICO | TRIASICO | JURASICO | CRETACICO | PALEOGENO | NEOGENO

250 MA · 205 MA · 142 MA · 65 MA · 24 MA · 1,8 MA



les, en el mantillo del suelo o en la superficie de las aguas dulces. Se diversifican poco durante los 50 millones de años del Devónico. Por el contrario, en esa época los miriápodos, las arañas y los escorpiones abundan y se diversifican.

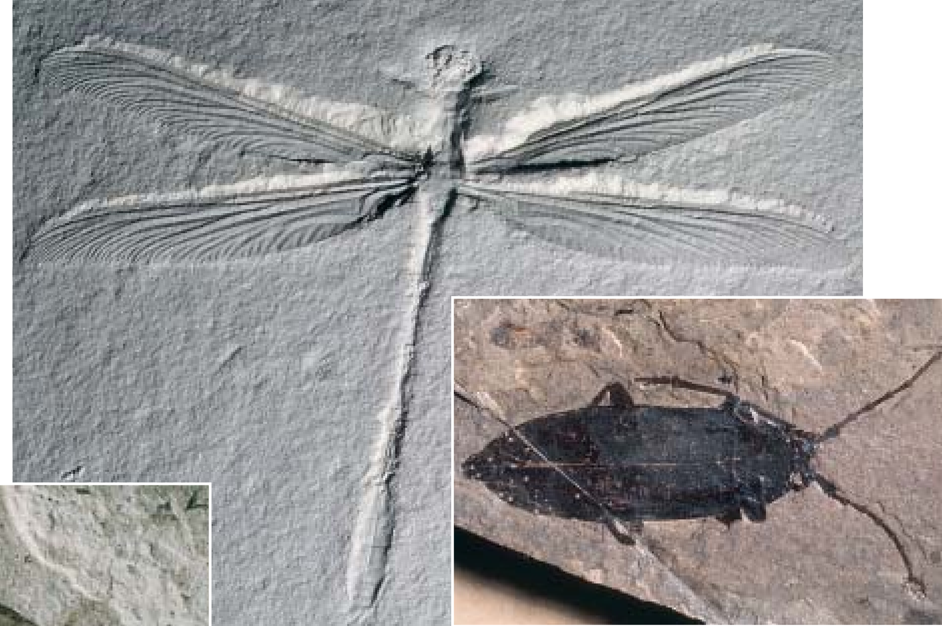
Hay que esperar cerca de 40 millones de años y el principio del Carbonífero superior (el Carbonífero se extiende de 354 a 290 millones de años) para que aparezcan entomofaunas (faunas de insectos) ricas y variadas. En esa época Europa y América del Norte se encuentran a la altura del ecuador y están cubiertas de densos bosques tropicales, cálidos y húmedos, que se convertirán en cuencas hulleras. Las faunas de insectos del Carbonífero proceden, casi todas, de lugares de extracción de hulla. No tenemos información sobre los insectos que vivían en las regiones templadas en esa época.

Los fósiles que aparecen en la hulla revelan que los insectos experimentaron su primera explosión evolutiva en el Carbonífero. Por cada especie de miriápodo, de araña o de escorpión carboníferos, los paleoentomólogos han descubierto más de 20 especies de insectos. Progresivamente, los insectos empezaron a dominar las faunas de artrópodos, predominio que no abandonarán. Entre esos insectos carboníferos se encuentran detritívoros, fitófagos picadores y chupadores, consumidores de hojas y de tallos y también carnívoros. Aparte de algunos "gigantes", la mayoría de esos pequeños animales de seis patas tienen unas dimensiones equiparables a las de los insectos de hoy en día: entre cinco y diez milímetros de longitud.

Esta primera explosión evolutiva fue desencadenada por una "invención genial": el ala. El hecho de ser los primeros animales que conquistaron el aire les dotó de una ventaja evolutiva considerable. La facultad de volar les ayudó a escapar de los depredadores terrestres y les permitió colonizar un buen número de nuevos medios. Desde un punto de vista tanto morfológico como paleontológico, la aparición de los insectos alados sigue envuelta en el misterio. ¿Resultó de la hipertrofia de las branquias laterales o de los segmentos torácicos? ¿O quizá las alas derivaron de los apéndices secundarios de las patas que tienen los crustáceos?

La "invención" del ala

Desde la paleontología no hay forma de arrojar luz sobre ese misterio: la primera ala conocida de insecto es ya el producto de una larga evolución. Sólo sabemos que apareció en una "ventana" de 40 mi-



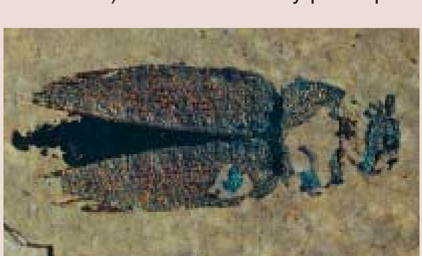
MUSEO NACIONAL DE HISTORIA NATURAL

3. ESTA AVISPA PRIMITIVA (*a la izquierda*) aparecida en el Triásico aún vivía hace diez millones de años. Toda la elegancia de la libélula del Jurásico (*en el centro*) se ha conservado en esta calcárea litográfica bávara. A la derecha, un fósil de longicornio, insecto consumidor de madera aparecido ya en el Jurásico.

VALIOSOS INDICADORES DE LA BIODIVERSIDAD

En el guión de la película *Parque Jurásico*, Michael Crichton considera que el ADN de dinosaurio se ha conservado en el estómago de unos mosquitos incluidos en el ámbar. No pudo haber tal. Las moléculas de ADN no mantienen su integridad más allá de unos 500.000 años. Pero existen enclaves que guardan restos completos y perfectamente conservados; el antiguo cráter volcánico de Menat, en Cantal, y el yacimiento de ámbar del Oise son dos lugares de este tipo.

Junto a otra estación canadiense, el yacimiento de ámbar del Oise es el único lugar insectífero conocido del límite Paleoceno/Eoceno (hace unos 53 millones de años). El ámbar del Oise también es excepcional por haber permanecido *in situ* desde su fosilización. Se ha hallado asociado a fósiles de maderas, semillas, hojas y vertebrados, en un brazo muerto de un antiguo río, donde abundaban las tortugas de agua dulce y los cocodrilos. Estos últimos atacaban a los peces y mamíferos, por lo que menudean también restos óseos más o menos digeridos y coprolitos (excrementos fósiles) de cocodrilos. El clima parece haber sido cálido, con alternancia de estaciones secas y húmedas. El ámbar del Oise no fue producido por resinosas, sino por una planta con flores próxima de las leguminosas actuales.



Los bupréstidos abundaban en las márgenes del lago de Menat. Sus fósiles todavía conservan la librea roja mezclada de verde metálico, típica de esos coleópteros xilófagos.

Los fósiles que contiene son, en su mayoría, insectos de algunos milímetros de longitud. Aunque predominan dípteros (moscas, tábanos) e himenópteros (avispas), están representados todos los órdenes modernos y son similares, si no idénticos, a sus equivalentes actuales.

El yacimiento de Menat corresponde a un cráter de un antiguo volcán del Macizo Central Francés. Su antigüedad, de 58 a 60 millones de años, lo sitúa en el Paleoceno, apenas cinco millones de años después del final del Cretácico. Era un lago de 500 metros de diámetro, poblado de una decena de especies de peces y donde medraban también los cocodrilos, indicio de un clima cálido y húmedo. Las boas reptaban por el bosque tropical vecino, rico en numerosas especies de árboles con flores y grandes hojas envolventes.

Los fósiles se encuentran en un tipo de roca oscura, casi negra, formada por restos de diatomeas —algas microscópicas— y por espículas de esponjas de agua dulce. Abundan los insectos, con tallas sobresalientes (de cuatro a cinco centímetros de longitud) y en perfecto estado de conservación. Los fósiles recuperados —el más antiguo abejorro, por ejemplo— revelan que determinados insectos de principios del Cenozoico eran muy próximos a sus descendientes actuales. Curiosamente, las faunas descubiertas en Menat difieren de las de otros lugares lacustres del Eoceno y del Oligoceno francés, en que las cucarachas y los coleópteros comedores de madera (longicornios y bupréstidos) son los más abundantes, mientras que escasean los dípteros. Estas divergencias se explican por las características del lugar: el bosque denso y húmedo que rodeaba el lago, y donde abundaban los vegetales en putrefacción, favoreció la multiplicación de insectos detritívoros. Menudean, por tanto, los bupréstidos, coleópteros xilófagos. Suelen retener su rojo tornasolado, mezclado de verde metálico, aun cuando los pigmentos se hayan degradado por la fosilización.

llones de años, en el Carbonífero inferior. Pero se trata de un intervalo temporal en blanco para la paleontología. No se ha hallado todavía ningún fósil de esa época.

Algunos insectos que medraron por entonces pertenecen a grupos estrictamente paleozoicos (característicos de la era primaria), presentes sólo en los estratos geológicos del Carbonífero y el Pérmico. Hay entre ellos formas “gigantes”. La más conocida es la libélula carnívora *Meganeura monyi*, cuya envergadura alcanzaba 70 centímetros. Sin embargo, debemos matizar la apreciación de tal gigantismo; pese a su envergadura alar, el cuerpo de este insecto no era mayor que el de un gran fásmido o insecto palo o el de un escarabajo tropical actual. Sin duda, se alimentaba de grandes paleodictiópteros (un grupo extinto de fitófagos picadores y chupadores). Otros grupos de insectos aparecidos en el Carbonífero tienen descendientes que viven todavía hoy en día: insectos alados, como las cucarachas (probablemente detritívoras) o los ortópteros, antepasados de los saltamontes, langostas y grillos modernos, probablemente fitófagos.

Las líneas ancestrales de los primeros insectos “modernos”, es decir, de tipos aún presentes hoy en día, surgirían en el Carbonífero. Desgraciadamente, no se ha encontrado ningún fósil de estos insectos alados en los yacimientos carboníferos. ¿Cuándo aparecieron esos insectos “modernos”? Lo ignoramos, pero ello sucedió sin duda durante una larga laguna paleontológica del Carbonífero superior. Se diversificarían durante la explosión evolutiva que siguió a la adquisición del ala. El número considerable de descendientes —hoy en día representan el 95 % de la diversidad de la clase de los insectos— es una prueba lejana de la intensidad de esa “explosión”.

Cualquiera que haya sido el período de aparición de esos primeros insectos “modernos”, medraban ya en el período siguiente, el Pérmico. Esta edad geológica (de hace entre 295 y 245 millones de años) debe su nombre a los sedimentos de la región de Perm, en los Urales. En Francia, se le asocia generalmente a un período de alternancia de estaciones secas y estaciones húmedas. Los sedimentos negros del Carbonífero son reemplazados por sedimentos rojos (sur de Francia). ¿Quiénes eran esos “recién llegados” en el Pérmico inferior?

De entrada, todos los mecopteroides, es decir, los antepasados de los mecópteros actuales; también, lepidópteros, o mariposas, y dípteros. Los mecópteros están dotados de un

MUSEO NACIONAL DE HISTORIA NATURAL









MUSEO NACIONAL DE HISTORIA NATURAL

4. LAS TERMITAS (*a*) aparecieron en el Cretácico. Son antiguas cucarachas que han evolucionado para fundar sociedades. La avispa (*b*) constituye otro ejemplo de insecto social. Apareció también en el Cretácico, lo mismo que el saltamontes hoja (*c*) y la mariposa diurna (*d*).

órgano genital rojo, dispuesto a la manera de la cola de un escorpión. Los lepidópteros (etimológicamente, "con ala cubierta de escamas") tienen dos pares de alas recubiertas de escamas coloreadas y una espiritrompa, o trompa enrollada en espiral, para aspirar el néctar de las flores. Después, los dípteros (moscas, tábanos y mosquitos), que, como su nombre indica, presentan las dos alas posteriores reducidas a balancines.

Los "recién llegados" comprenden, asimismo, los neurópteros y los coleópteros. Esos mecopteroides —escarabajos peloteros, cárabos, escarabajos de San Antón, cetónidos, mariquitas— manifiestan una característica distintiva: su primer par de alas se ha transformado en dos estuches rígidos que protegen el segundo par de alas membranosas; con sus cuatro alas, los neurópteros guardan cierta semejanza con las mariposas: son ejemplos la hormiga león y los ascaláfidos.

Y apareció la crisálida...

La diversificación de esas líneas modernas de insectos alados se relaciona con una segunda "explosión evolutiva": la de la crisálida. Esta "invención" permite esperar que terminen los períodos desfavorables. Existen dos tipos de insectos que pasan por la fase de crisálida: los insectos con metamorfosis incompleta (cucarachas, dermápteros o tijeretas, por ejemplo) y los insectos con metamorfosis completa (coleópteros y lepidópteros, por ejemplo).

Menos evolucionados, los primeros desarrollan un ciclo más rudimentario, que comienza con la puesta de los huevos sobre una hoja, un fruto o un cadáver; este huevo se desarrolla en una prelarva vermiforme; después, atraviesa una serie de fases juveniles antes de mudar a adulto. En el curso de sus fases larvarias, el insecto con metamorfosis incompleta se parece al adulto, aunque es sexualmente inmaduro y sus alas no son funcionales.

Más evolucionados, los insectos con metamorfosis completa desarrollan un ciclo más largo, que comprende una fase inmóvil, la de crisálida. Este ciclo comienza también por la puesta de un huevo sobre un recurso alimentario; el embrión se convierte en una prelarva que después muda a una serie de larvas (hasta tres formas sucesivas). De tipo vermiforme, esas larvas son muy diferentes de los adultos, y a menudo explotan unos recursos alimenticios distintos de los del adulto. De mayor tamaño, la última larva forma la crisálida, en la que se producirá lo esencial de la transformación morfológica en adulto.

Los insectos con metamorfosis completa han resultado aventajados en el curso de la evolución. Capaces de atravesar los períodos poco favorables sin alimentarse (en el seno de la crisálida), pueden también explotar una mayor diversidad de recursos durante su desarrollo. Denominados holometábolos, hoy en día representan el 90 por ciento de la diversidad actual de la clase de los insectos.

La diversificación de los insectos como grupo prosigue en el Pérmico superior (hace entre 258 y 245 millones de años). El ambiente de los yacimientos insectíferos conocidos se convierte entonces en globalmente más seco y con mayores contrastes. Aparecen nuevas floras: las gimnospermas, es decir, principalmente, las coníferas y las araucarias. Aunque algunos de los insectos gigantes con metamorfosis incompleta han sabido adaptarse a esas nuevas condiciones, los insectos del antiguo grupo del tipo paleodictióptero del Carbonífero se han ido rarificando progresivamente. Sin embargo, hay que señalar dos excepciones notables: las efímeras y los odonatos (los paleodictiópteros no están emparentados con el grupo moderno de los dictiópteros, al cual pertenecen las termitas, las cucarachas y las mantis).

Conocidos con el nombre de libélulas o caballitos del diablo, los odonatos son temibles depredadores de insectos, que patrullan por la superficie del agua a la búsqueda de presas. Las efímeras se les parecen, pero son herbívoras (si es que ello tiene alguna importancia, ya que el adulto a menudo no vive más allá de un día). Su característica singular consiste en tener una muda imaginal además del ciclo clásico de metamorfosis: de la última fase lar-





5. EL NEUROPTERO de la izquierda y la cucaracha a la derecha son dos especies de insectos arcaicos que, sin embargo, se han adaptado bien al desarrollo de las plantas con flores del Cretácico inferior.

varia emerge un animal que vuela, se posa sobre el agua o sobre una hoja, y muda de nuevo a otro animal volador, apto ya para la reproducción.

A principios del período siguiente, en el Triásico (hace entre 245 y 205 millones de años), todos los paleodictiópteros habían desaparecido, excepto los odonatos y las efímeras. Tranquilo desde el punto de vista geológico, el Triásico es muy marino. En Europa, mares epicontinentales cálidos rodean las islas dispersas. En tierra, los reptiles y las coníferas dominan bajo un clima caluroso y marítimo. El Triásico ve también la aparición de los dinosaurios y de los primeros mamíferos. Prosigue la diversificación de los insectos con metamorfosis completa.

El Triásico se considera el primer período de multiplicación de la mayoría de los órdenes de insectos actuales (dípteros, himenópteros, lepidópteros, etc.). Las líneas surgidas en el Pérmico se diversifican y adquieren su aspecto moderno. Así, a pesar de la persistencia de algunas formas arcaicas, la mayoría de los insectos del Triásico (moscas, crisopas, escarabeidos, avispas) son más o menos parecidos a los insectos actuales. Los coleópteros (escarabajos de San Antón, cárabos, cetónidos, escarabajos de la patata, mariquitas) se hacen con la posición dominante que han mantenido hasta la fecha. Existirían más de 300.000 especies.

La evolución prosigue durante el período siguiente, el Jurásico (hace entre 205 y 135 millones de años). Entonces, Europa se halla bajo las aguas, como en el Triásico. Este período se caracteriza por la diversificación de los dinosaurios y de las gimnospermas (coníferas, secuoyas, araucarias, cicadales, ginkgos). En los insectos se diversifican numerosas líneas. Aparecen nuevas familias. Las libélulas, por ejemplo, se diversifican de manera espectacular; se configuran siete grandes grupos, de los cuales tres persisten aún.

Sin embargo, la "edad moderna" de los insectos no empieza hasta el Cretácico inferior (hace entre 135 y 96 millones de años), cuando el desarrollo de ecosistemas comparables a los actuales desencadena la tercera explosión evolutiva. El Cretácico inferior es bastante cálido, y en Europa el clima sigue siendo muy oceánico. Se forman los primeros yacimientos de ámbar. Al final del Cretácico inferior, y después en el Cretácico superior, un acontecimiento transformará el planeta: las angiospermas (o plantas con flores) también se diversifican de manera explosiva.

Las plantas o árboles con flores toman el relevo de las gimnospermas, preeminentes en el Jurásico. Desde entonces, las angiospermas no han cedido en su predominio. Conocemos hoy más de 235.000 especies de angiospermas frente a 721 especies de gimnospermas.

Insectos y polen

Tal éxito obedeció a una nueva estrategia de polinización: mientras que la polinización de las gimnospermas se produce principalmente gracias al viento, la de las angiospermas depende a menudo de los animales. Estos hallan nuevas fuentes de alimentación en las flores y frutos de las angiospermas; a cambio los animales, los insectos en particular, transportan el polen de éstas.

¿Se debe a la explosión de las angiospermas la espectacular proliferación de especies de insectos en el Cretácico? ¿Ocurrió el proceso en sentido contrario? Un fenómeno es cierto: las nuevas líneas de insectos y las de plantas con flores del Cretácico coevolucionan. Se transforman de manera simultánea, al tiempo que ejercen mutua influencia. A causa de su importancia numérica, los insectos se convierten pronto en los principales polinizadores.

Su coevolución con las angiospermas ha contribuido a la diversidad de plantas con flores. Existe un gran número de flores que sólo son polinizadas por un insecto específico, por ejemplo por tal o cual

MUSEO NACIONAL DE HISTORIA NATURAL

especie de abeja, de escarabajo o de mariposa. El polen de una planta tiene así menos posibilidades de hacerse transportar hacia otra de su misma especie, y el polinizador mantiene un "monopolio" sobre su fuente de alimento.

Para establecer este sutil equilibrio, el perfume y el color de una flor a menudo se han adaptado al olfato y a la vista del polinizador. Las flores libadas por las abejas disponen, por ejemplo, de nectarios, es decir, glándulas secretoras de néctar (un líquido rico en glucosa) que atrae al pequeño animal volador, el cual viene a fabricar su miel. Esos nectarios que guían a la obrera permanecen invisibles para la mayoría de animales, mientras que son claramente percibidos por las abejas, que poseen ojos sensibles a los ultravioleta. Estos ejemplos demuestran hasta qué punto, en el curso de su coevolución, muchos insectos y angiospermas se han convertido en interdependientes. No exageramos si afirmamos que los insectos que aparecen con las angiospermas son los que ponen en funcionamiento los ecosistemas formados en el Cretácico, es decir, nuestros ecosistemas.

En el Cretácico inferior, la "coevolución" de las angiospermas y de los insectos ha privilegiado la diversificación de ciertas líneas. Los insectos favorecidos por esta tercera explosión evolutiva son o bien insectos con metamorfosis completa, o bien grupos muy antiguos aparecidos en el Carbonífero, que han conseguido adaptarse a nuevos medios. Entre estos últimos, los *Mantidae* (mantis), descendientes de las cucarachas, un grupo muy antiguo de detritívoros, son temibles carnívoros que han conservado la metamorfosis incompleta de sus ancestros.

La multiplicación de recursos que deriva de las angiospermas se ve asimismo acompañada por la aparición de todos los insectos sociales, como las avispas véspidas, las abejas, los abejorros y las hormigas, insectos esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas actuales. Caracterizados por un abdomen pedunculado y por dos pares de alas de longitud desigual, se trata de especies emparentadas entre sí; pertenecen al grupo de los himenópteros. La hormiga más antigua conocida, por ejemplo, procede del Albiense superior de Charentes, el penúltimo subperíodo del Cretácico inferior.

En el Cretácico superior (hace entre 96 y 65 millones de años), la evolución simultánea de los insectos y las angiospermas se ve acompañada de grandes cambios en los ecosistemas terrestres. Las faunas de dinosaurios se renuevan. Numerosas líneas antiguas de insectos, hasta entonces florecientes y ampliamente distribuidas, se extinguen en la transición Cenomaniense/Turoniense (hace unos 100 millones de años). Este fenómeno implica en especial las faunas de agua dulce.

El caso más espectacular es el de las libélulas *Aeschnidiidae*, la familia más numerosa y frecuente en los yacimientos del Jurásico superior y del Cretácico inferior. El último representante conocido procede del Cenomaniense de Crimea. La desaparición de los *Aeschnidiidae* está probablemente relacionada con los cambios acaecidos en las faunas de agua dulce. En la misma época entra en escena la familia de los *Libellulidae*, hoy dominante, que reemplaza a los *Aeschnidiidae*. Se estima que los insectos del Cretácico superior abundaban en número y formas no menos que los de hoy en día: probablemente representaban más de la mitad de las especies animales existentes.

A partir del Cretácico superior (hace entre 100 y 65 millones de años) y en el Cenozoico, casi todos los insectos pertenecían a las familias actuales. Aunque algunas familias vivas de insectos se remontan al Jurásico superior, la mayoría proceden del Cretácico superior. Algunas especies fósiles del Mioceno inferior son muy próximas, prácticamente idénticas a las especies actuales. Sin embargo, hay que esperar hasta el final del Mioceno (hace entre 23,5 y 5,3 millones de años) y el Plioceno (hace entre 5,3 y 1,65 millones de años) para que todos los insectos sean los que ahora nos rodean.

Recapitulación

Así pues, la diversificación de los insectos se vio favorecida por tres explosiones evolutivas, cada una de las cuales fue consecuencia de una "invención genial". Se han convertido en los "señores del mundo": omnipresentes y adaptados a todos los medios, constituyen, además, el motor de todos los ecosistemas de plantas con flores que nos suministran el 90 por ciento de nuestra alimentación. ¿Deberíamos, pues, preocuparnos por los insectos?

Los entomólogos comprueban que el número de especies de insectos disminuye año tras año en todos los continentes. Las causas son la deforestación masiva y rápida, la agricultura y la industrialización agresivas, la contaminación del agua, del suelo y del aire, la superpoblación. En Francia, decenas de especies de insectos que eran frecuentes hace una veintena de años han desaparecido en toda la mitad septentrional del territorio. En el sur del país, la situación también es inquietante: en el curso de dos campañas recientes de muestreo de mariposas, hemos constatado, por ejemplo, el empobrecimiento de la flora y de la entomofauna de las praderas alpinas en las inmensas zonas del parque nacional de Queyras.

La rápida destrucción de los últimos bosques vírgenes intertropicales tiene consecuencias aún más dramáticas. Las plantas y los insectos de los cuales dependen desaparecen más deprisa de lo que se tarda en recolectarlos y describirlos. Sabemos que, desde el Cretácico superior, casi todas las plantas con flores —nuestra principal fuente de nutrición— son polinizadas por insectos. Pese a ello, ni los estudiamos, ni nos preocupamos de su conservación, ni parece importarnos su pérdida de biodiversidad. ¿No estaremos destruyendo nuestra biosfera sin darnos cuenta?

Bibliografía complementaria

INSECTES DE FRANCE ET DE L'EUROPE OCCIDENTALE. Michael Chinery. Reedición de 1998, Arthaud.

THE INSECTS OF AUSTRALIA. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Melbourne University Press, Carlton, Victoria, 1994.



HACE DIEZ AÑOS no habría podido tenerse mucha fe en un dibujo como éste. Se desconocía el origen de las explosiones de rayos gamma —fogonazos de radiación de alta energía que se encienden en el cielo, un par al día en promedio—. Se asocian tales explosiones a la extinción de las estrellas. Un agujero negro creado al implosionar una estrella gigante absorbe polvo y gas, pero dispersa también cierta cantidad de esos mismos materiales. Una serie de ondas de choque genera la radiación.

Las explosiones más brillantes del universo

Cada vez que se produce una erupción de rayos gamma, nace un agujero negro

Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard

Un telescopio robótico captó a primera hora de la mañana del 23 de enero de 1999, en Nuevo México, una fuente débil de luz en la constelación Corona Borealis. Apenas se podía apreciarla con prismáticos. Jamás, sin embargo, había presenciado la humanidad una explosión más brillante. Nos llegaba desde una distancia de nueve mil millones de años luz, más de la mitad del tamaño del universo perceptible. Si ese mismo fenómeno hubiera ocurrido a miles de años luz, habría brillado como el sol del mediodía y exterminado la vida de la faz de la Tierra.

Se trató de una erupción de rayos gamma (o GRB, por su acrónimo en inglés). El dos de julio de 1967 se observó una; la registraron unos satélites militares destinados al seguimiento de pruebas nucleares. Esas explosiones cósmicas diferían mucho de las causadas por el hombre. Durante la mayor parte de los 35 años transcurridos desde entonces, cada nuevo estallido añadía obscuridad al misterio. Cuando se pensaba que se contaba ya con una explicación, nuevas pruebas nos devolvían al punto de partida.

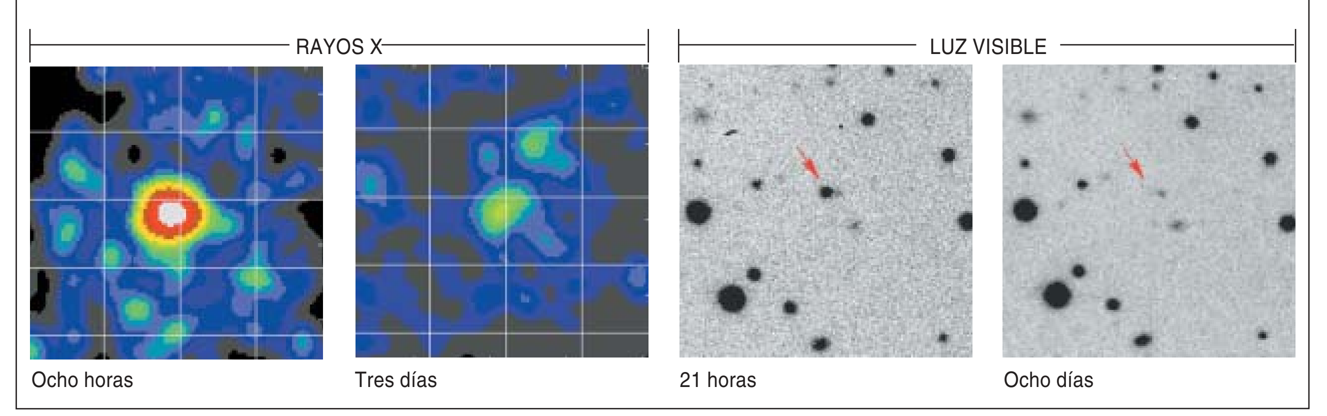
Los impresionantes descubrimientos de los últimos años nos han acercado a la respuesta definitiva. Antes de 1997, casi todo lo que conocíamos sobre las GRB se basaba en los registros de BATSE ("Experimento de Estallidos y Fuentes Transitorias"), instrumento a bordo del Observatorio Compton de Rayos Gamma. BATSE observó que ocurren dos o tres GRB por día en cualquier lugar del universo. Sobrepasan en brillo a los demás objetos del cielo. Aunque no hay dos GRB iguales, cabe clasificarlas en un par de grupos básicos, las cortas y las largas —éstas son la mayoría—, según duren menos o más de dos segundos. Ambas categorías se distinguen espectralmente: las erupciones cortas expiden más rayos gamma de alta energía que las largas. La erupción de 1999 emitió rayos gamma durante minuto y medio.

MARK A. GARLICK

RESCOLDOS CALIENTES

RAYOS X: a las ocho horas de la explosión del 28 de febrero de 1997, gracias al satélite BeppoSAX, se observó un rescoldo en rayos X. La segunda imagen se tomó un par de días más tarde; para entonces, la intensidad de esa radiación se había quedado en la vigésima parte.

LUZ VISIBLE: Gracias a la reacción, muy rápida también, del observatorio de La Palma se detectó el mismo rescoldo, pero en luz visible. A lo largo de la semana siguiente el brillo se redujo hasta una sexta parte del inicial y empezó a despuntar la galaxia donde ocurrió la erupción.



ENRICO COSTA *Instituto de Astrofísica Espacial y de Física del Cosmos, CNR* Y EL EQUIPO DEL BEPPOSAX *(izquierda)*; PAUL J. GROOT *Universidad de Amsterdam (derecha)*

El resultado más importante de BATSE, no obstante, consistió en establecer que la distribución de las GRB es isótropa, que se esparcen de forma homogénea por todo el cielo. Este descubrimiento contradijo la creencia más extendida: que las erupciones provenían de fuentes de la Vía Láctea; si hubiera sido así, la forma de nuestra galaxia, o la posición descentrada de la Tierra dentro de ella, habría agrupado las explosiones en ciertas regiones del cielo. La distribución uniforme llevó a muchos a concluir que los instrumentos observaban un fenómeno que se repetía por todo el universo. Por desgracia, no bastaban los rayos gamma para zanjar la cuestión. Había que detectar la radiación de las erupciones en otras longitudes de onda. La luz visible, por ejemplo, descubriría en qué galaxias sucedían; así se podrían medir distancias. Los esfuerzos realizados por hallar manifestaciones ópticas asociadas a las GRB fracasaron.

Progresos

Se dio un paso adelante en 1996 con el satélite de rayos X BeppoSAX, construido y controlado por la agencia espacial italiana, con participación de la holandesa. Localizó las GRB de forma precisa y descubrió el subsiguiente rescoldo en rayos X. El rescoldo aparece al desvanecerse la señal de rayos gamma. Persiste de unos días a unos meses; va disminuyendo y convirtiéndose en una radiación menos potente, en luz visible y radioondas. BeppoSAX detectó sólo los rescoldos de erupciones largas —no se han observado aún los análogos de las cortas—, pero posibilitó por fin un seguimiento prolongado de lo que ocurría una vez pasada la GRB. Al facilitar BeppoSAX la posición, los telescopios ópticos y de radio podían identificar las galaxias en las que tenían lugar las GRB. Casi todas sucedían a miles de millones de años luz; su potencia era inmensa [*véase* "Destellos de rayos gamma", por Gerald J. Fishman y Dieter H. Hartmann; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1997]. Energías extremas implican causas extremas. Los objetos más extremos que se conocían eran los agujeros negros.

Entre los primeros GRB avistados por BeppoSAX se encontró GRB 970508, así llamado porque se observó el ocho de mayo de 1997. Las observaciones en radio de su rescoldo proporcionaron una pista clave. El brillo más o menos se duplicó durante las tres primeras semanas, para después estabilizarse y empezar a disminuir. Estas variaciones probablemente no tuvieron nada que ver con la fuente de la erupción en sí misma; más bien guardaban relación con la propagación de la luz del rescoldo a través del espacio. Así como la atmósfera de la Tierra provoca el "parpadeo" de la luz de las estrellas, el plasma interestelar produce una oscilación de las radioondas. Para que este

Resumen/*Las erupciones de rayos gamma*

- Durante treinta años, el estudio de las erupciones de rayos gamma avanzó despacio. Se carecía de un esquema general de los procesos implicados en su aparición.
- En los últimos cinco años, sin embargo, las observaciones han puesto de manifiesto que en el curso de dichas erupciones nace con violencia un agujero negro. La mayoría de los agujeros negros se crean al contraerse en sí misma una estrella de gran masa, proceso que libera un impulso de radiación perceptible a miles de millones de años luz de distancia.
- Ahora se avanza más deprisa. Se van perfilando las teorías. En particular se busca una explicación de la increíble diversidad de las erupciones.

Los autores

NEIL GEHRELS, LUIGI PIRO y PETER J. LEONARD analizan y observan las explosiones de rayos gamma. Gehrels y Piro dirigen el observatorio Compton de rayos gamma y el satélite BeppoSAX, respectivamente. Leonard trabaja para Aplicaciones y Sistemas Científicos, Inc., que colabora con las misiones del Centro Goddard.

fenómeno sea perceptible, la fuente debe ser tan pequeña y hallarse tan lejos que nos parezca un simple punto. Los planetas no titilan porque, cercanos a nosotros, los vemos como discos, no como puntos.

Por tanto, si GRB 970508 parpadeó en radiofrecuencias para luego apagarse, es que la fuente creció; de un simple punto se convirtió en un disco apreciable. "Apreciable" en este caso significa un diámetro de unas pocas semanas luz. Para alcanzar este tamaño, tuvo que expandirse a un ritmo considerable, casi a la velocidad de la luz.

BeppoSAX y las observaciones posteriores han cambiado por completo nuestra forma de entender las GRB. Se ha descartado la vieja idea de una energía concentrada que se libera en unos segundos. Se admite que la misma palabra "rescoldo" conduce a error: no difiere mucho la energía radiada durante las dos fases (la explosión y el rescoldo). El espectro del rescoldo viene a ser el de electrones que se mueven casi a la velocidad de la luz en un campo magnético.

La erupción de enero de 1999 (GRB 990123) fue crucial para demostrar el inmenso poder de estas erupciones. Si hubiera radiado su energía en todas las direcciones por igual, su luminosidad habría sido varias veces 10^{45} watt; es decir, 10^{19} veces el brillo del Sol. Aunque el otro tipo de cataclismo cósmico que nos es conocido, las supernovas, libera cantidades similares de energía, una gran parte escapa en forma de neutrinos y el resto se desprende más gradualmente que en una GRB. En consecuencia, la luminosidad de una supernova en un momento determinado es sólo una pequeña fracción de la luminosidad de una GRB. Los propios cuásares, muy brillantes, emiten una potencia de 10^{40} watt.

No obstante, si la erupción hubiera liberado su energía en una dirección particular en vez de en todas direcciones, habría que calcularle una luminosidad menor. La prueba de que existía una dirección privilegiada se obtuvo al analizar el debilitamiento temporal del rescoldo del GRB 990123. Dos días después de la explosión, el ritmo de caída del brillo aumentó de repente, tal y como debía suceder si la radiación provenía de un chorro estrecho de materia que se movía a velocidades próximas a la de la luz. Por un efecto relativista, el observador va viendo un volumen creciente del chorro a medida que éste se frena. En un momento dado, ya no hay más que ver, y el brillo aparente comienza a caer muy deprisa (*véase el recuadro* "Haces de luz"). En el caso del GRB 990123 y de otros GRB, se ha deducido un ángulo de abertura del chorro de unos pocos grados. Sólo si el chorro apunta hacia nosotros podremos observarlo. Este direccionamiento reduce la energía liberada en la erupción en razón directa al cuadrado del ángulo del chorro. Por ejemplo, si el chorro abarca 10 grados, cubrirá alrededor de una parte de 500 del cielo; la energía emitida decrecerá, pues, en un factor de 500. Dicho de otra forma, por cada GRB que se observa, 499 permanecen ocultos. Incluso una vez tenido en cuenta el direccionamiento, la potencia luminosa de GRB 990123 mantiene el valor impresionante de 10^{43} watt.

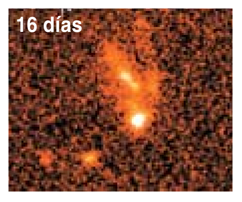
La conexión GRB-supernova

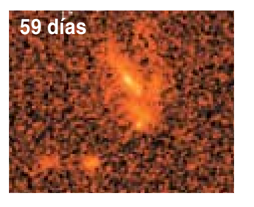
Uno de los descubrimientos más interesantes ha sido el de la conexión entre las GRB y las supernovas. Cuando los telescopios observaron GRB 980425 descubrieron a la vez una supernova, SN 1998-bw, que había explotado más o menos al mismo tiempo que esa GRB. La probabilidad de que se debiera a una mera coincidencia no pasa de uno entre diez mil.

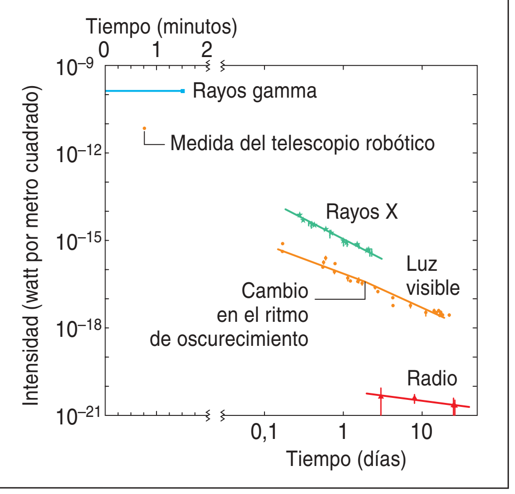
Respalda la conexión entre las GRB y las supernovas la detección de hierro en los espectros de rayos X de varias erupciones. Se sabe que los átomos de hierro se sintetizan y expulsan al espacio interestelar cuando estallan las superno-

LA EXTINCION

La erupción de rayos gamma más intensa que se haya observado ocurrió el 23 de enero de 1999. Los telescopios siguieron la evolución de su brillo en rayos gamma (*color azul en la gráfica*), rayos X (*verde*), luz visible (*naranja*) y ondas de radio (*rojo*). En un momento dado, el ritmo a que se debilitaba cambió bruscamente; daba a entender que la radiación provenía de estrechos chorros de materia lanzada a muy alta velocidad. Unas dos semanas después de la erupción, una vez la intensidad de la luz visible había caído cuatro millones de veces, el telescopio espacial Hubble fotografió la región; encontró una galaxia muy distorsionada, signo distintivo de las galaxias donde se crean estrellas en abundancia. Si las erupciones de rayos gamma se deben al estallido de estrellas jóvenes, habrán de ocurrir precisamente en lugares así.







CORNELIA BLIK (*gráfica*); ANDREW FRUCHTER *Instituto Científico del Telescopio Espacial* Y NASA



vas. Cuando esos átomos pierden sus electrones —luego se recombinarán con ellos— producen una luz distintiva a ciertas longitudes de onda, las líneas de emisión. Las primeras detecciones, aún frágiles, de tales líneas por BeppoSAX y por el satélite de rayos X japonés ASCA en 1997 han tenido confirmación sólida hace poco. Chandra, el observatorio de rayos X de la NASA, observó líneas de hierro en GRB 991216; pudo medirse así directamente la distancia a esa erupción. El valor de la medición coincidió con la distancia que se le estimaba a la galaxia que la albergó.

Otras observaciones apuntan también a la conexión entre GRB y supernovas. Se ha hallado una línea de absorción correspondiente al hierro en el espectro de rayos X del GRB 990705. En el envoltorio de gas que rodea a las erupciones, el satélite multiespejo de rayos X de la Agencia Espacial Europea ha encontrado líneas de emisión de silicio, azufre, argón y otros elementos que se producen en las supernovas.

Aún no ha concluido el debate, pero cada vez son más quienes sostienen que una misma clase de objeto produce, en ciertos casos, la GRB y la supernova. Puesto que las GRB son menos numerosos que las supernovas —cada día estallan dos GRB en distintos lugares del universo y cientos de miles de supernovas—, no puede decirse que cada supernova esté asociada a una GRB. Pero algunas sí podrían estarlo. Según una variante de esta idea, las supernovas expulsan en ocasiones chorros de material y dan lugar a la GRB. En la mayoría de los casos se detectaría bien la supernova o bien la GRB, pero no los dos fenómenos a la vez. Si los chorros apuntan hacia la Tierra, la luz de la GRB solapará la luz de la supernova; si se dirigen en otra dirección, sólo la supernova será visible. En unos pocos casos, en cambio, apuntaría el chorro ligeramente fuera de nuestra línea de visión; cabría entonces detectar la GRB y la supernova. Este desalineamiento podría explicar la naturaleza de GRB 980425.

Esta hipótesis relaciona la mayoría de las GRB, o todas, con las supernovas. Otros atribuyen sólo un subconjunto de GRB a las supernovas. BATSE ha encontrado unas noventa GRB que conforman una clase especial, caracterizada por luminosidades muy bajas y largos retardos espectrales. De estas propiedades se deduce que los impulsos de rayos gamma de alta y baja energía llegan con segundos de diferencia. Se ignora el porqué de esta falta de sincronización. Pero sea cual sea la razón, parece que estas GRB ocurren con la misma frecuencia que una clase particular de supernova, el tipo Ib/c, ligado a la implosión del núcleo de las estrellas de gran masa.

Las bolas de fuego

Dejando aparte la cuestión de cómo se genera la energía de una GRB, su propio brillo absoluto define una paradoja. Las variaciones rápidas indican que la emisión mana de una región muy pequeña: la luminosidad de 10^{19} soles se origina en un volumen no mayor que el Sol. Con tamaña radiación procedente de un objeto tan pequeño, la agrupación de los fotones debería llegar a tal densidad, que su interacción les impidiese escapar. Pero, si los rayos gamma no escapan, ¿cómo vemos las GRB?

La respuesta a este enigma, desarrollada a lo largo de los últimos años, estriba en que los rayos gamma no se emiten inmediatamente. La energía inicial liberada en la explosión se almacena en forma de energía cinética en un envoltorio de partículas —una bola de fuego— que se desplaza a velocidades próximas a la lumínica. Entre las partículas se cuentan fotones y electrones, éstos con su antimateria, los positrones. La bola de fuego se expande hasta que llega a un diámetro de diez mil o cien mil millones de kilómetros y la densidad fotónica cae lo suficiente como para que los rayos gamma escapen sin mayores impedimentos. La bola de fuego convierte entonces parte de su energía cinética en radiación electromagnética; se produce la GRB.

Cuando la materia rápida alcanza a la lenta, se generan dentro de la bola de fuego en expansión unas ondas de choque. Estas emiten, parece lo más probable, la radiación gamma inicial. Puesto que la bola de fuego se desplaza a velocidades próximas a la de la luz, la escala de tiempos se comprimirá para un observador externo según dictan los principios de la relatividad: detectará un destello de rayos gamma que durará sólo unos pocos segundos, pese a que quizás abarcó un día entero. La bola de fuego continúa su expansión y se encuentra con el gas circundante. Se forma otra onda de choque, ahora en la frontera entre la bola de fuego y el medio ex-

JUAN VELASCO

terno; persiste mientras la bola de fuego se va frenando. Este choque externo explica bien el rescoldo y su degradación a rayos X, luz visible y, finalmente, radioondas.

La bola de fuego da cuenta de la transformación de la energía explosiva en la radiación observada. Pero, ¿cuál es el origen de la energía explosiva inicial? Se ignora. Una familia de modelos comprende, bajo la denominación de hipernovas o colapsares, estrellas nacidas con masas 20 o 30 veces la solar. Las simulaciones muestran que el núcleo central de estos astros se derrumba sobre sí mismo y crea un agujero negro que rota muy deprisa, rodeado de un disco de materia residual.

Una segunda familia de modelos se refiere a los sistemas binarios formados por dos objetos densos de tamaño reducido, así una pareja de estrellas de neutrones (cadáveres estelares ultradensos) o de estrella de neutrones y agujero negro. Los dos objetos giran en espiral entre sí, hasta que se fusionan en uno solo. Como en el caso de las hipernovas, al final queda un solo agujero negro rodeado por un disco.

La combinación de un agujero negro y un disco circundante constituye un fenómeno habitual. Esta en concreto se distingue por la gran masa del disco (que permite una liberación gigantesca de energía) y la ausencia de una compañera estelar que le suministre materia (la energía se desprende en una sola explosión). El agujero negro y el disco cuentan con dos grandes reservas energéticas: la energía gravitatoria del disco y la energía de rotación del agujero. No se sabe bien cómo se convierten estas dos energías en rayos gamma. Es posible que durante la creación del disco se genere un campo magnético 10^{15} veces más intenso que el campo magnético terrestre. Calentaría el disco hasta temperaturas que engendrasen una bola de fuego de rayos gamma y plasma. La bola de fuego se canalizaría en dos chorros que saldrían a lo largo del eje de rotación.

La explicación de la emisión de las GRB encaja en el modelo de las hipernovas; también en la fusión de un par de objetos en uno. Para distinguir entre ambos modelos hay que recurrir a otras propiedades. La asociación entre GRB y supernovas, por ejemplo, respalda la hipótesis de las hipernovas, que no son sino supernovas muy grandes. Aún

LA ERUPCION

UNA ERUPCION DE RAYOS GAMMA podría desencadenarse por la fusión de dos estrellas de neutrones o con el colapso de una estrella de masa muy grande. Los dos procesos dan lugar a un agujero negro rodeado de un disco de material. El sistema formado por el agujero negro y el disco escupirá un chorro de materia a velocidades próximas a la de la luz. Las ondas de choque que se engendran en ese chorro producen la radiación.

JUAN VELASCO

más, las GRB se encuentran sobre todo en los lugares donde se espera que haya hipernovas: en las regiones galácticas donde prosigue la formación de estrellas. Una estrella de gran masa explota pronto, unos millones de años tras su nacimiento; el lugar donde muere está muy cerca de donde nació. La fusión de objetos compactos es un proceso más largo, de miles de millones de años, durante el cual esos objetos se desplazan por la galaxia. Si fuera el motor de las GRB, éstas no ocurrirían con preferencia en las regiones donde nacen estrellas.

Parece muy probable que las hipernovas causen la mayoría de las GRB. Pero a la fusión de estrellas compactas quizá le corresponda también un papel; tal vez se le deba la existencia de las GRB de corta duración. Además, se sigue trabajando en otras posibilidades; por ejemplo, la producción de la bola de fuego mediante la extracción de energía de un agujero negro cargado eléctricamente. Según este modelo, el barrido exterior que realiza la bola de fuego durante su expansión crea la emisión inmediata y el rescoldo. Se va progresando en el conocimiento de las GRB, pero hay que precisar más la causa y detallar mejor su rica variedad, sus subclases.

Los recientes descubrimientos apuntan a que las GRB ofrecen vías para responder algunas de las preguntas fundamentales de la astronomía: ¿Cómo termina la vida de las estrellas? ¿Cómo y dónde se forman los agujeros negros? ¿Cuál es la naturaleza de los chorros que salen de los objetos contraídos en sí mismos?

Explosiones del pasado

Una de las cuestiones importantes que quedan por resolver es la planteada por las GRB oscuras, o "fantasma". De las 30 GRB que se han estudiado en rayos gamma y en otras longitudes de onda, el 90 por ciento se detectaba también en rayos X. Por el contrario, sólo se ha hallado en luz visible al 50 por ciento. ¿Por qué hay explosiones de las que no nos llega luz visible?

Una explicación podría ser que las GRB suceden en regiones de formación estelar, por lo normal repletas de polvo. El polvo bloquea la luz visible, pero no los rayos X. Cabría otra posibilidad: que estos fantasmas consistan en GRB que ocurren a enormes distancias; el gas intergaláctico absorbería la luz producida. Para probar esta hipótesis habría que determinar distancias a partir de los espectros en rayos X. De acuerdo con una tercera posibilidad, las erupciones fantasma aparecerían, por naturaleza, muy débiles en el visible. Hoy día, las observaciones favorecen la hipótesis del polvo. Las investigaciones ópticas y de radio han identificado las posibles galaxias anfitrionas de dos GRB oscuras; ambas se encuentran a distancias moderadas.

Vayamos con otro misterio: el de las "GRB ricas en rayos X", o destellos de rayos X. Los descubrió el BeppoSAX; el hallazgo se confirmó al volver a analizar los datos del BATSE. Representan entre el 20 y el 30 por ciento de las GRB. Producen más radiación en rayos X que en rayos gamma; en los casos más extremos no se observa luz alguna en rayos gamma.

Para explicar ese comportamiento se propone que la bola de fuego estaría cargada de una gran cantidad de materia bariónica —bariones son, por ejemplo, los protones—; que fuera una "bola de fuego sucia". La presencia de ese tipo de partículas aumentaría la inercia de la bola; al desplazarse ésta más despacio, disminuiría su capacidad de convertir los fotones en rayos gamma. Podría aducirse también que los destellos de rayos X se originaran en galaxias muy lejanas, mucho más que las que albergan las GRB fantasma. La expansión cósmica convertiría los rayos gamma en rayos X y el gas intergaláctico bloquearía el rescoldo visible. Ningún destello de rayos X ha tenido una manifestación óptica asociada, resultado que concuerda con la segunda de las dos hipótesis.

El destino de las estrellas de mayor masa

LAS ESTRELLAS PASAN LA MAYOR PARTE DE SU VIDA en la fase de secuencia principal, durante la cual convierten hidrógeno en helio en sus interiores mediante la fusión nuclear. El Sol se encuentra en esa fase. De acuerdo con la teoría estelar básica, las estrellas con una masa mayor que la solar brillan más intensamente y queman más deprisa su combustible. Una estrella 20 veces más pesada que el Sol brillará un tiempo mil veces menor.

A medida que se agota el hidrógeno del interior, el núcleo se contrae, se calienta y empieza a quemar elementos más pesados, como el helio, el oxígeno y el carbono. La estrella entra entonces en la fase de gigante; si cuenta con masa suficiente, se convertirá en una supergigante. Si la masa inicial de la estrella es al menos ocho veces superior a la solar, continuará quemando más y más elementos pesados hasta llegar al hierro. La fusión del hierro no libera energía —al contrario, la necesita—. De repente, la estrella se encuentra sin ningún combustible útil.

El resultado es una contracción sobre sí misma catastrófica. El núcleo se convierte en una estrella de neutrones, cadáver estelar que almacena al menos una masa un 40 por ciento mayor que la del Sol en una bola con apenas 10 kilómetros de radio. Una explosión de tipo supernova expulsa violentamente el resto de la estrella al espacio.

Existe un límite para la masa de una estrella de neutrones, entre el doble y el triple de la masa del Sol. En cuanto lo sobrepase, se formará un agujero negro. Cruzará dicho umbral si recibe materia de fuera. Pero también es posible que el agujero negro se forme directamente en el desplome del astro original. Las estrellas que nacieron con una masa más de 20 veces mayor que la del Sol podrían estar destinadas a acabar como agujeros negros. La creación de éstos explicaría las erupciones de rayos gamma.

CORNELIA BLIK

Tipos de erupciones de rayos gamma

TIPO DE ERUPCION (SUBTIPO)	PORCENTAJE DE TODAS LAS ERUPCIONES	DURACION TIPICA DE LA EMISION INICIAL (SEGUNDOS)	EMISION INICIAL DE RAYOS GAMMA	EMISION DEL RESCOLDO EN RAYOS X	EMISION DEL RESCOLDO EN EL VISIBLE	HIPOTETICO MOTOR CENTRAL	EXPLICACION DE PROPIEDADES PARTICULARES
Larga (normal)	25	20	✓	✓	✓	Explosión muy energética de una estrella de gran masa	No corresponde
Larga (fantasma u oscura)	30	20	✓	✓	✗	Explosión muy energética de una estrella de gran masa	Lejanísima, oscurecida por polvo o en sí muy débil
Larga (rica en rayos X o destello de rayos X)	25	30	✗	✓	✗	Explosión muy energética de una estrella de gran masa	Lejanísima o debilitada por partículas adicionales
Corta	20	0,3	✓	?	?	Fusión de dos objetos compactos	No ocurre en regiones de formación estelar, por lo que el gas ambiente es menos denso y los choques externos más débiles

Si los destellos de rayos X o las GRB fantasmas se localizasen en galaxias muy lejanas, nos iluminarían una era de la historia cósmica que, si no, permanecería oculta.

Para avanzar en la astronomía de las GRB, se debe ahora profundizar en los datos obtenidos de las erupciones, los rescoldos y la galaxia anfitriona. Se tienen que medir varios cientos de explosiones de diferentes tipos: largas y cortas, brillantes y débiles, que se presenten sólo en rayos gamma o en rayos X, con rescoldos visibles o no. Hoy, se determina la posición de las erupciones con el segundo Explorador de Fenómenos Transitorios de Altas Energías, satélite lanzado en octubre de 2000, y con la Red Interplanetaria, una serie de pequeños detectores de rayos gamma instalados en sondas planetarias. La misión "Swift", cuyo lanzamiento está previsto para el próximo otoño, obtendrá datos de cientos de GRB y de sus rescoldos en varias longitudes de onda. Cuando descubra una explosión, el instrumento de rayos gamma activará automáticamente los sensores de rayos X y ópticos, instalados a bordo. Esta respuesta rápida determinará si la GRB tiene análogos en rayos X y en el visible. La misión será sensible a las explosiones de corta duración, apenas estudiadas.

También se quiere investigar las energías extremas de los rayos gamma. La GRB 940217, por ejemplo, emitió rayos gamma de alta energía hasta pasada más de una hora tras la explosión; lo observó el Telescopio del Experimento de Rayos Gamma Energéticos, a bordo del Observatorio Compton. Se desconoce el mecanismo productor de estos rescoldos tan duraderos y de tan alta energía. El satélite AGILE, de la Agencia Espacial Italiana, cuyo lanzamiento está programado para 2004, observará estas GRB a altas energías. El Telescopio Espacial para el Estudio de los Rayos Gamma, un instrumento de suma sensibilidad que se espera sea lanzado en 2006, también resultará fundamental para el estudio de estos desconcertantes fenómenos.

Ayudarán mucho otras misiones, pese a que no se hayan concebido sólo para descubrir GRB. El Laboratorio Astrofísico Internacional de Rayos Gamma, lanzado el 17 de octubre pasado, detectará entre 10 y 20 erupciones al año. El Telescopio de Imágenes de Rayos X Energéticos, proyectado para dentro de una década, tendrá entre sus instrumentos un detector muy sensible de rayos gamma capaz de observar miles de GRB.

Bibliografía complementaria

GAMMA-RAY BURSTS OF DOOM. Peter J. T. Leonard y Jerry T. Bonnell en *Sky & Telescope*, vol. 95, n.º 2, págs. 28-34; febrero de 1998.

OBSERVATION OF X-RAY LINES FROM A GAMMA-RAY BURST (GRB 991216): EVIDENCE OF MOVING EJECTA FROM THE PROGENITOR. Luigi Piro et al. en *Science*, vol. 290, págs. 955-958; 3 de noviembre de 2000.

GAMMA-RAY BURSTS: ACCUMULATING AFTERGLOW IMPLICATIONS, PROGENITOR CLUES, AND PROSPECTS. Peter Mészáros en *Science*, vol. 291, págs. 79-84; 5 de enero de 2001.

BLINDED BY THE LIGHT. Stan Woosley en *Nature*, vol. 414, págs. 853-854; 20 de diciembre de 2001.

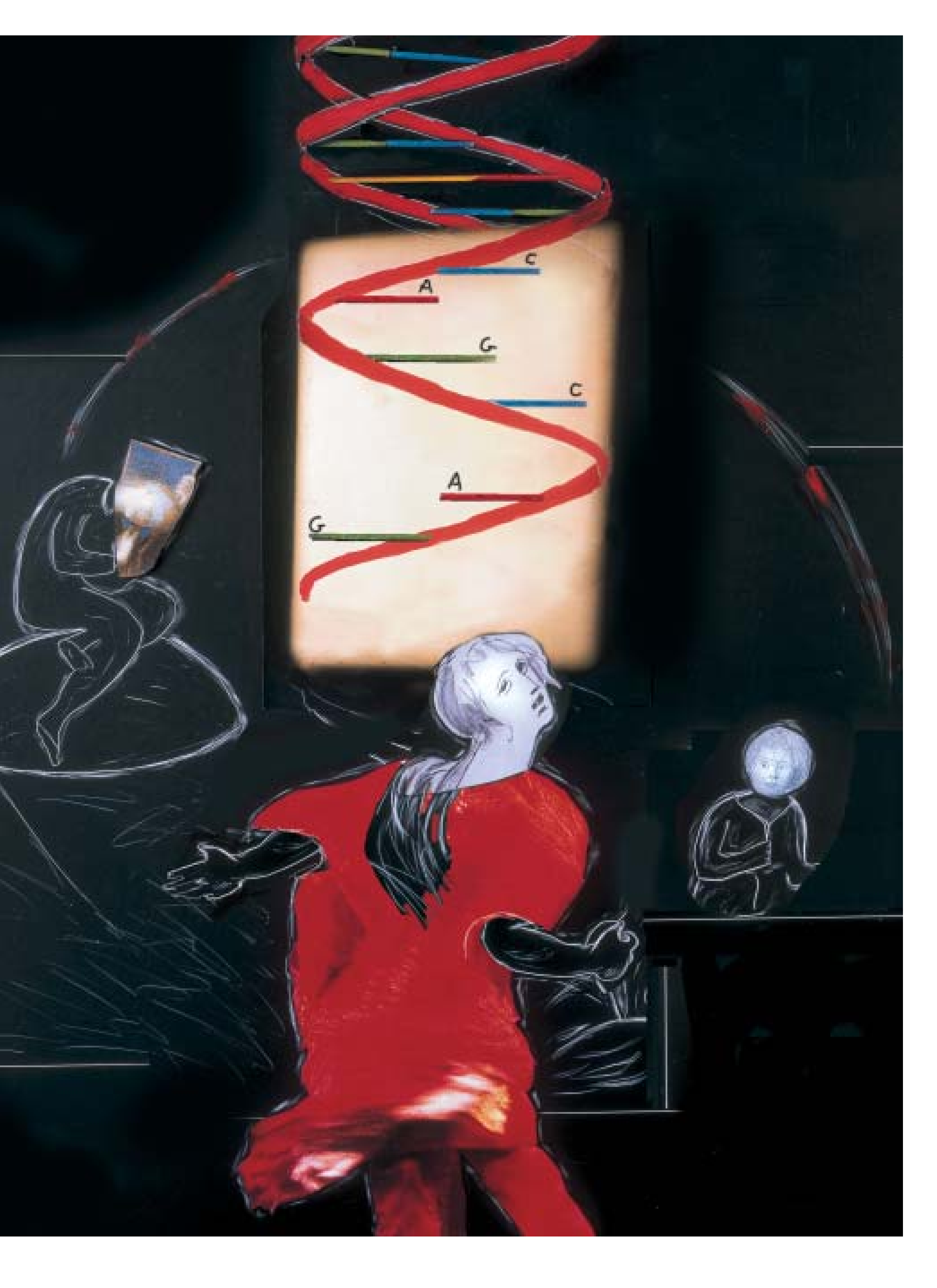
THE BIGGEST BANGS: THE MYSTERY OF GAMMA-RAY BURSTS, THE MOST VIOLENT EXPLOSIONS IN THE UNIVERSE. Johathan I. Katz. Oxford University Press, 2002.

FLASH! THE HUNT FOR THE BIGGEST EXPLOSIONS IN THE UNIVERSE. Govert Schilling. Cambridge University Press, 2002.

Enfermedad de Huntington

Aunque hace diez años que se aisló el gen responsable de la enfermedad de Huntington, continúa la búsqueda de sus mecanismos destructores

Elena Cattaneo,
Dorotea Rigamonti
y Chiara Zuccato



1. LA ENFERMEDAD DE HUNTINGTON ataca en plena madurez. Provoca movimientos involuntarios danzantes, deterioro mental y angustia, que apartan al paciente de la vida normal. En la raíz del trastorno se encuentra una repetición extendida de la secuencia citosina-adenina-guanina (CAG) en el ADN.

Muecas extrañas dan un primer aviso. Luego, las personas afectadas se tornan más distraídas y comienzan a realizar gestos involuntarios, sobre todo en situaciones de estrés físico o psicológico. A medida que la enfermedad progresa, menudean movimientos como pasos de baile o tumbos de ebrio. La invalidez se hace más patente. Los enfermos se sienten incapaces de acometer las tareas rutinarias, al par que ven mermadas sus funciones intelectuales; no saben organizarse. En los estadios más avanzados aparecen la depresión y la agresividad; en los casos más graves, la demencia y la psicosis. El que antes era un miembro activo de la familia, un amigo o un compañero de trabajo vivaz se torna una sombra desvalida.

Así podemos perfilar el cuadro ingrato de la enfermedad de Huntington, un trastorno hereditario que suele mostrar su virulencia en la flor de la vida, a los 30 o 40 años. Sin tratamiento eficaz, la enfermedad avanza lenta e inexorable hacia la incapacidad total y la muerte en 15 o 20 años. Aunque la enfermedad afecta fundamentalmente al sistema nervioso central, la mayoría de los individuos que la padecen fallecen por complicaciones cardiacas, complicaciones respiratorias o por lesiones en la cabeza causadas por las frecuentes caídas.

En 1993, un extenso grupo de investigadores (58) de todo el mundo, entre ellos James F. Gusella y Francis S. Collins, identificaron el gen causante de la enfermedad de Huntington. Muy pronto se dispuso de pruebas genéticas para determinar si las personas con familiares enfermos habían heredado el gen mutante. Por tratarse de un gen dominante, quienes reciban la forma mutante heredarán la enfermedad y presentarán un 50 por ciento de posibilidades de transmitir el gen a cada uno de los hijos. Algunos optan por someterse a la prueba y encarar así mejor su futuro; otros prefieren desconocer su situación.

Mientras tanto, debe seguir la ciencia trabajando para comprender de qué modo el gen mutante causa la enfermedad, con el fin de "engañar", a través de un tratamiento, al mecanismo desencadenante. Sabemos ya que la mutación comporta una consecuencia doble: codifica una proteína anormal, que resulta ser tóxica para las células nerviosas, y, además, la proteína defectuosa deja de producir un factor de crecimiento clave, arruinando una determinada zona del cerebro. De la investigación animal —y algunas pruebas clínicas en el hombre— se desprende la posibilidad de que los tratamientos con factores de crecimiento contrarresten los efectos perversos del mal. Pero los hallazgos se revelan muy precarios. Hay que ahondar más en el estudio de las complejidades de la enfermedad de Huntington.

De la enfermedad de Huntington al gen *huntingtin*

Nuestra patología evoca a su descubridor, George Huntington. En 1872, este médico de Ohio aportó datos minuciosos de una peculiar enfermedad hereditaria que él y su padre, también médico, habían observado en una familia de Long Island, en el estado de Nueva York. Los pacientes realizaban movimientos grotescos, sin coordinación. Le puso el nombre de "corea" (del griego *choreia*, "danza"). Sabemos ahora que la enfermedad de Huntington es uno de los trastornos hereditarios del cerebro más frecuentes; afecta aproximadamente a una persona de cada 10.000.

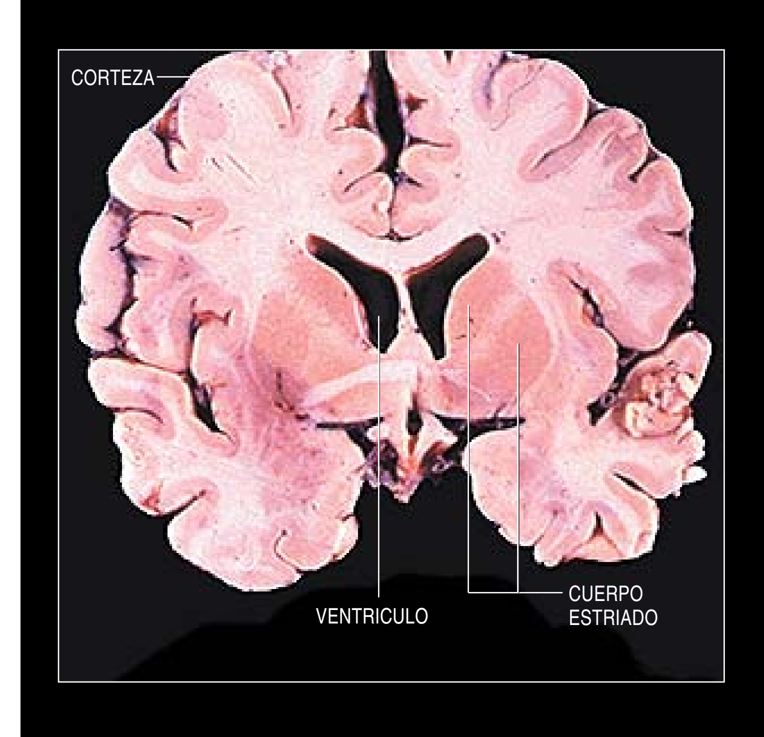
Los síntomas de la enfermedad de Huntington se deben a la degeneración de las células, o neuronas, del cuerpo estriado, una región del interior profundo del cerebro que forma parte de los ganglios basales (*véase la figura 2*). En condiciones de normalidad, estas neuronas funcionan apagando las señales excitadoras de la corteza motora, la estructura cerebral que dicta el movimiento. Cuando mueren, la corteza motora se torna hiperactiva, lo que precipita la aparición de movimientos involuntarios (a los que se da también el nombre de corea). Se ignora en virtud de qué la muerte de las neuronas del cuerpo estriado produce los síntomas psicológicos de la afección.

Al gen que sufre la mutación en la enfermedad de Huntington se le denomina *huntingtin*. Se aloja en uno de los extremos del cromosoma 4. Los genes son segmentos de la doble hélice de ADN que codifican la información para sintetizar proteínas. La clave, o código, consiste en las combinaciones de cuatro unidades, las bases adenina (A), timina (T), citosina (C) y guanina (G). Las bases se emparejan entre sí para formar los peldaños de la escalera del ADN: T se empareja con A, y C se empareja con G. Cuando una célula necesita sintetizar nuevas proteínas, la hélice se

LESLIE JEAN-BART

desenrolla y los peldaños se escinden, de suerte que la maquinaria celular puede leer el código. Un triplete de tres bases codifica cada uno de los 20 aminoácidos ensartados en diversas combinaciones para formar los millones de proteínas de nuestro organismo.

Tras identificarse el gen *huntingtin*, se advirtió que incluso en las personas normales contiene un tipo de obturador o cierre molecular en que el triplete CAG se repite de nueve a 35 veces. (Estas repeticiones expandidas pueden ocurrir también en genes distintos, asociados con otras enfermedades neurodegenerativas.) Pero en los pacientes con enfermedad de Huntington, el cierre en cuestión se prolonga de una forma desmesurada; en algunos casos, raros, puede llegar hasta 250 repeticiones. Se ha descubierto, además, que los sujetos que muestran un número elevado de repeticiones CAG tienden a desarrollar la enfermedad antes que los que tienen un cierre más corto. Y por razones desconocidas, el número de repeticiones CAG puede aumentar de una generación a la siguiente en familias con enfermedad de Huntington (suele ocurrir más a menudo si se hereda del padre el gen mutado).



Las teorías

El triplete CAG codifica el aminoácido glutamina (Q). Las personas con la forma mutante del gen *huntingtin* poseen las correspondientes proteínas huntingtin, que contienen las secciones de poliglutamina integradas por 36 o más unidades de Q. Pero, ¿cómo justificar que las glutaminas extra en una proteína originen la enfermedad?

De acuerdo con la explicación más simple, la serie adicional de poliglutamina destruiría la capacidad de la proteína huntingtina para desempeñar su función habitual en el cerebro. Se trata de la "hipótesis de la pérdida de función". Tal propuesta se descartó muy pronto. Las primeras investigaciones demostraron que la huntingtina se producía no sólo en el cuerpo estriado —la región que se atrofia en la enfermedad—, sino también en el resto del cerebro, incluso en regiones que no parecen resentirse durante el curso de la enfermedad de Huntington. Además, las personas portan dos copias de cada gen (una de la madre y otra del padre), por lo que los pacientes deberían tener una copia correcta del gen *huntingtin* y producir así una buena cantidad de la proteína adecuada. De igual manera, no presentan síntoma alguno de corea los pacientes con el síndrome de Wolf-Hischorn: en esta rara patología se halla borrada una región extensa del cromosoma 4, en la que está incluida una copia del gen *huntingtin*.

Una postura alternativa, la hipótesis de la ganancia o adquisición de función, sostiene que la mutación del gen *huntingtin* fabrica una forma tóxica de la proteína huntingtina. De acuerdo con dicha hipótesis, la extensa zona de poliglutamina resultante de la mutación del gen *huntingtin* altera la forma de la proteína mutante, permitiendo que se adhiera a diversas proteínas, fundamentalmente a la huntingtina normal; al trabarse con ella, la inutilizaría. La presencia de esos enlaces entre proteínas podría explicar el carácter dominante del gen transmitido. Max F. Perutz y su equipo, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge, determinaron que las hileras de poliglutamina de la huntingtina mutante se pliegan para crear una lámina beta, que se sabe que actúa como un pegamento entre proteínas. Erich E. Wanker, del Centro Max Delbrück de Medicina Molecular de Berlín, Gillian P. Bates, del Hospital Guy de Londres, y Marian DiFiglia, del Hospital General de Massachusetts, han observado agregados de huntingtina mutante en los cerebros de ratón que sirven de modelo de la enfermedad y en las neuronas del cuerpo estriado y de la corteza de pacientes fallecidos con la enfermedad de Huntington.

Resumen/*Enfermedad de Huntington*

- La enfermedad de Huntington produce discapacidad y causa demencia en la edad media de la vida. De carácter hereditario, la patología se debe a una mutación en el gen *huntingtin*, alojado en el cromosoma 4.
- Pese a que pueden realizarse ensayos y pruebas genéticas, carecemos de un tratamiento eficaz.
- Las personas destinadas a padecer la enfermedad de Huntington portan un obturador molecular que les fuerza a sintetizar una forma mutante de la proteína huntingtina en la que un mismo aminoácido, la glutamina, se repite docenas de veces.
- La huntingtina mutante, letal para determinadas neuronas, carece, sin embargo, de la capacidad de activar el gen de un factor de crecimiento necesario para la función cerebral.

UNIVERSIDAD DEL ESTADO DE MICHIGAN



2. LA DEVASTACION DEL CEREBRO en la enfermedad de Huntington se centra predominantemente en el cuerpo estriado, una región profunda del cerebro que forma parte de los ganglios basales. El cuerpo estriado se muestra extenso y saludable en el cerebro de una persona que murió por causas distintas de la enfermedad de Huntington (*izquierda*); está atrofiado, en cambio, en el cerebro de un paciente fallecido de este mal (*derecha*).

Sin embargo, sigue siendo objeto de debate el mecanismo por cuya virtud estos agregados causan la lesión neuronal en la enfermedad de Huntington. Para unos, los proteosomas —estructuras celulares que destruyen proteínas deterioradas o tóxicas— son incapaces de desembarazarse de la proteína huntingtina mutante, de conformación aberrante. De ese modo, la huntingtina mutante se va acumulando sin freno, reventando las células. Pero la hipótesis de la ganancia o adquisición de función no encuentra explicación satisfactoria de un fenómeno llamativo: por qué quedan ilesas las regiones del cerebro distintas del cuerpo estriado.

Otras hipótesis interpretan los hechos desde una óptica distinta. En vez de ser responsables de la enfermedad, los agregados representarían un mecanismo de defensa que protegiera de los efectos tóxicos de la poliglutamina a las células. Resulta imperioso investigar la función de tales agregados para entender la enfermedad de Huntington; el dar con un método que evitara su formación o fomentara su disgregación facilitaría el descubrimiento de nuevos fármacos para el tratamiento de la enfermedad. Wanker y sus colaboradores han diseñado una prueba de laboratorio para identificar fármacos potenciales que puedan evitar que la huntingtina mutante forme agregados.

Otra línea de investigación se basa en la identificación de moléculas que se expresan específicamente en el cuerpo estriado y que pueden interaccionar con la huntingtina. Si esas moléculas quedan atrapadas en los agregados, podrían contribuir a la toxicidad. Hasta el presente se han identificado tres grupos de proteínas que interaccionan con la huntingtina, aunque ninguna parece justificar la naturaleza tóxica de la huntingtina mutante o explicar por qué sólo las neuronas del cuerpo estriado mueren en la enfermedad de Huntington.

Un salvavidas

Para salir de tamaño laberinto, las autoras, Scott Zeitlin y varios más nos propusimos determinar la función de la huntingtina normal en el cerebro. En un primer paso, aplicamos técnicas de ingeniería genética para insertar copias adicionales del gen *huntingtin* normal, o de sus formas mutantes, en neuronas cultivadas en placas de petri. En el año 2000 informamos de una primera observación: las células que producen un exceso de huntingtina normal sobrevivían cuando se les retiraba el medio de cultivo o se colocaban en condiciones que, de suyo, habría de provocarles la muerte. Más aún, advertimos que la huntingtina normal parece mantener vivas las neuronas al detener la cascada de procesos moleculares que habitualmente desembocan en la apoptosis, o muerte celular programada. De todo ello hemos llegado a la conclusión de que la huntingtina se comporta a manera de proteína salvavidas de las neuronas.

El grupo de Zeitlin ha aportado nuevos datos a este respecto, al generar ratones "knockout" condicionales, en los que ambas copias del gen *huntingtin* pueden desconectarse cuando los animales llegan a la madurez. Si se inactiva el gen, los ratones dejan de producir la proteína huntingtina normal y sufren lesiones graves en el cerebro. Zeitlin demostró también que la interrupción de la síntesis de huntingtina en diversos momentos de la vida del ratón provoca la muerte de las neuronas cerebrales por apoptosis. Además, comprobó que los ratones que carecen de la forma normal de huntingtina evidencian síntomas neurológicos semejantes a los ratones que expresan la forma mutante de la proteína; quizá, pues, la ausencia de huntingtina normal y la presencia de huntingtina mutante podrían ser las dos caras de una misma moneda.

Pero las investigaciones acometidas con ratones no pueden aclararnos por qué las neuronas del cuerpo estriado constituyen la diana preferente en la enfermedad de Huntington. Por eso, hemos centrado nuestra atención en el factor neurotrófico derivado del cerebro, el BDNF (del inglés "brain-derived neurotrophic factor"). Se conoce la importancia decisiva que este factor de crecimiento tiene para el desarrollo y supervivencia de las neuronas en el cuerpo estriado. Sintetizado en los cuerpos celulares de neuronas de la corteza, el BDNF viaja al cuerpo estriado por fibras que unen las dos regiones cerebrales. Había que empezar, pues, investigando la conexión entre la proteína huntingtina y el BDNF.

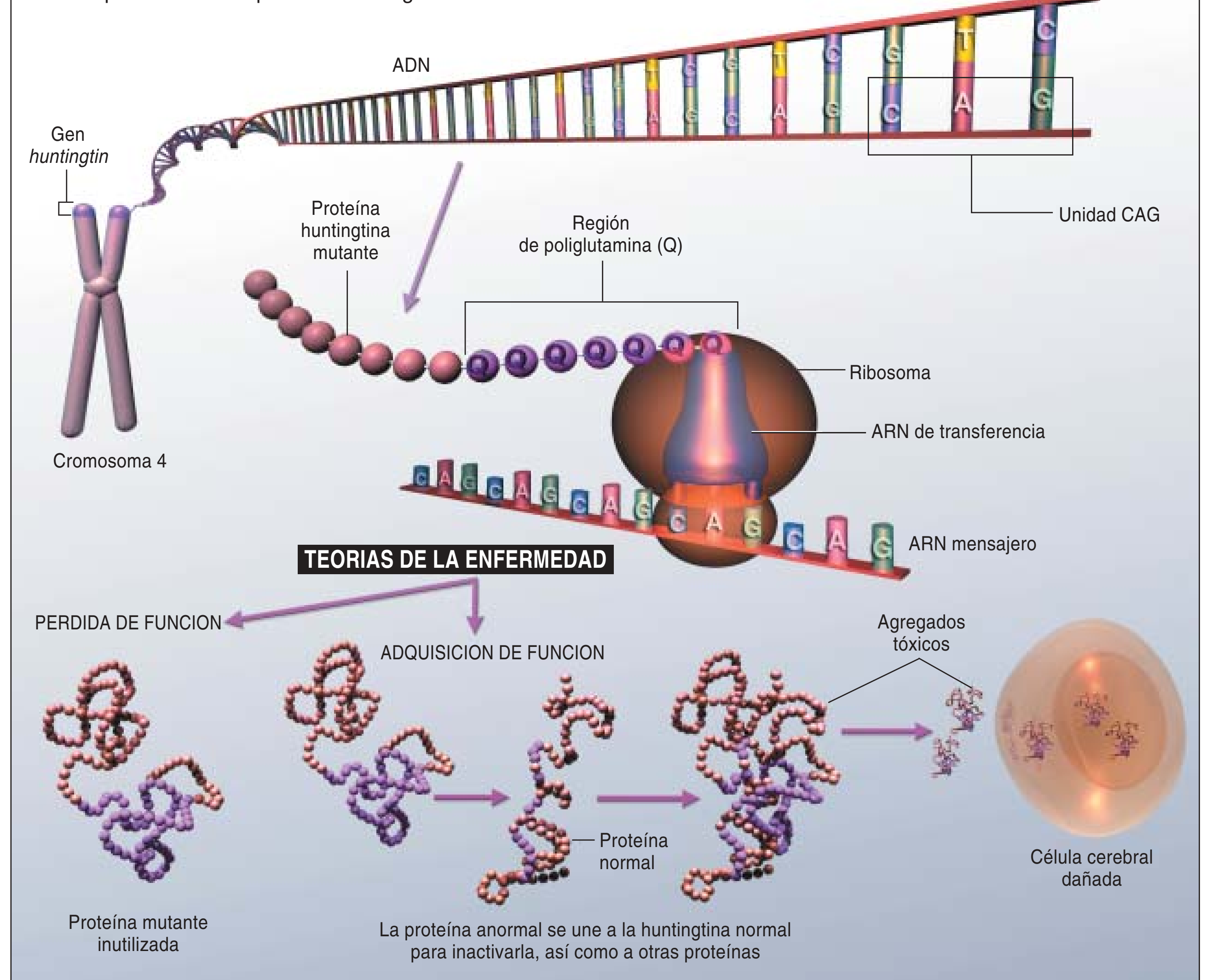
Hemos descubierto que la proteína huntingtina normal estimula la producción de BDNF en las neuronas que crecen en los cultivos del laboratorio. En particular, la huntingtina constituye el activador, o promotor, del gen que codifica el BDNF. Una vez activado el gen BDNF, las neuronas se entregan a la síntesis de ese factor de crecimiento. La huntingtina mutante, por el contrario, no estimula el promotor BDNF, lo que resulta en una merma de la producción de BDNF.

Hemos observado también que existe un nexo entre la huntingtina y el BDNF en ratones que Michael R. Hayden, de la Universidad de la Columbia Británica, había transformado por ingeniería genética. Esos animales experimentales producen un exceso de huntingtina normal y poseen cantidades elevadas de BDNF en el cerebro, lo que no acontece en los que presentan la huntingtina mutante.

Se advierte, pues, que la enfermedad de Huntington es una afección muy compleja, que no puede ahormarse en las hipótesis que habíamos adelantado. La mutación de la enfermedad de Huntington no sólo genera agregados tóxicos, letales para las células del cerebro, sino que priva, además, al cerebro de la huntingtina normal, que activaría al gen del factor de crecimiento BDNF. Ambos aspectos podrían hallarse relacionados. En 1999, el equipo de Robert M. Friedlander observó en ratones modificados por ingeniería genética que la forma mutante de la huntingtina destruía la versión original.

BASES MOLECULARES DE LA ENFERMEDAD DE HUNTINGTON

SOBRE LA APARICIÓN de la enfermedad de Huntington se han venido proponiendo tesis muy dispares. El gen *huntingtin*, responsable de la patología, se aloja en un extremo del cromosoma 4. En situaciones normales el gen contiene de nueve a 35 repeticiones del triplete citosina-adenina-guanina (CAG) en la secuencia de ADN; pero en las familias con enfermedad de Huntington, ese gen suele presentar de 40 a 60 repeticiones. Cuando se activa el gen *huntingtin*, su ADN se transcribe en el ARN mensajero que dirige la maquinaria celular de síntesis de proteínas. Entran en acción ARN de transferencia y ribosomas para fabricar la proteína huntingtina enlazando la secuencia adecuada de aminoácidos. Puesto que el triplete CAG codifica el aminoácido glutamina (“Q”), la huntingtina mutante contiene una extensa región de poliglutamina. Esta región podría causar la enfermedad al incapacitar la proteína huntingtina (teoría de la pérdida de una función) o permitir que se una e inactive a la proteína huntingtina normal u otras proteínas (teoría de la adquisición de una función). Esos agregados de proteínas resultan tóxicos para las células del cerebro. La mutación de la enfermedad de Huntington podría también causar la patología por una combinación de estos mecanismos.



ALFRED T. KAMAJIAN

¿Un rescate del cerebro?

Armados con un conocimiento más sólido de las complejidades de la enfermedad de Huntington, podemos dirigir nuestra atención al diseño de tratamientos mejores de la enfermedad. Los fármacos en uso alivian sólo algunos síntomas, pero pueden causar serios efectos colaterales. No es infrecuente que un fármaco mejore un síntoma y agrave otro. Aunque los médicos prescriben habitualmente sedantes a pacientes con enfermedad de Huntington para controlar sus movimientos involuntarios, estos fármacos producen una caída de los niveles del neurotransmisor dopamina en el cerebro, empeorando los síntomas depresivos de la persona. Los fármacos antidepresivos sacan de la depresión, aunque algunos tipos pueden exacerbar los movimientos espontáneos. Se aplican neurolépticos a los pacientes con alucinaciones y psicosis, pero con dosis bajas, para evitar los movimientos espásticos que estas medicaciones pueden inducir. Durante varios años, se han llevado a cabo pruebas con riluzole, un fármaco cuyo modo específico de acción es desconocido, si bien se utiliza ya en la esclerosis lateral amiotrófica (ELA, o enfermedad de Lou Gehrig), una neuropatía. Sin embargo, el éxito del fármaco en ambas enfermedades resulta ser bastante limitado.

En el ámbito del tratamiento, se realizan también otros ensayos más innovadores. Para reemplazar las neuronas perdidas, se proponen transplantes de tejido fetal o la inyección de factores neurotróficos (como el BDNF). El primer enfoque ha producido resultados alentadores, aunque provisionales, en pacientes en etapas precoces de la enfermedad de Huntington, aunque su uso presenta objeciones éticas al apoyarse en fetos abortados. El grupo de Marc Peschanski, del INSERM en Creteil, han transplantado neuronas fetales en el cuerpo estriado de cinco pacientes con enfermedad de Huntington; tres han experimentado mejorías apreciables de la función motora e intelectual. Para salir al paso de la disponibilidad limitada de células fetales y la controversia que les rodea, los esfuerzos se centran en el cultivo *in vitro* de células madre neurales, para su aplicación en transplantes. Pero las células madre son menos maduras que las células fetales. No sabemos a ciencia cierta si las células madre podrán desarrollarse e integrarse en el cerebro lesionado del paciente. E ignoramos si la huntingtina mutante que fabrican otras neuronas del paciente alterará la huntingtina normal producida por el transplante fetal o las células madre.

El segundo enfoque se basa en modelos animales. Muestran éstos que el factor neurotrófico ciliar (CNTF) puede proteger de la muerte a las células del cuerpo estriado. Pero cuesta transferir el CNTF al cerebro en cantidades suficientes y en forma activa. El BDNF y el CNTF, al ser proteínas, se destruyen en el estómago si se administran por vía oral; si se inyectan o se infunden, a veces no pueden cruzar la barrera de células que protege el cerebro de las sustancias circulantes en la sangre. Ante esos inconvenientes, el grupo dirigido por Patrick Aebischer, del Instituto Federal Suizo de Tecnología en Lausana, ha diseñado un protocolo de terapia génica por implante de cápsulas semipermeables. Las cápsulas contienen células modificadas genéticamente para que liberen CNTF en el ventrículo derecho del cerebro. Tras haber observado la liberación continua de CNTF por las cápsulas, el grupo de Aebischer se ha asociado con el de Peschanski para evaluar esta estrategia en un número limitado de pacientes. Se ha comenzado por ensayar con CNTF en pacientes, porque sus efectos de protección de las células del cuerpo estriado se descubrieron varios años antes de que se conocieran los beneficios del BDNF. Diversos grupos de investigadores intentan ahora someter a prueba el BDNF en animales; según los resultados, podrían pasar a pacientes con enfermedad de Huntington.

El promotor del BDNF podría convertirse también en blanco de fármacos contra la enfermedad de Huntington. Los medicamentos que remedan la función natural de la huntingtina, al activar el gen BDNF, podrían sortear la mutación de la huntingtina. Puesto que los fármacos actuarían después del efecto fisiológicamente esperado de la huntingtina, podría carecer entonces de relevancia la trabazón entre la huntingtina normal y su forma mutante. En el futuro, así lo vemos, la terapia de la enfermedad de Huntington se basará en fármacos que se opongan a la toxicidad de la huntingtina mutante al tiempo que restauren los efectos provechosos de la huntingtina normal. Si conseguimos arrojar luz sobre los recovecos del misterio que rodea a la patología quizás abramos nuevas esperanzas para la generación venidera.

Los autores

ELENA CATTANEO, DOROTEA RIGAMONTI y CHIARA ZUCCATO trabajan en el departamento de ciencias farmacológicas y en el centro de enfermedades neurodegenerativas de la Universidad de Milán. Cattaneo, profesora de biotecnología farmacológica, investiga las células madre y su uso en el tratamiento de afecciones neurodegenerativas. Rigamonti y Zuccato son miembros asociados posdoctorales del laboratorio de Cattaneo, Rigamonti se doctoró en la Universidad de Milán, Zuccato en la de Insubria en Varese.

Bibliografía complementaria

A NOVEL GENE CONTAINING A TRINUCLEOTIDE REPEAT THAT IS EXPANDED AND UNSTABLE ON HUNTINGTON'S DISEASE CHROMOSMES. The Huntington's Disease Collaborative Research Group en *Cell*, vol. 72, n.º 6, págs. 971-983, 26 de marzo de 1993.

LOSS OF NORMAL HUNTINGTIN FUNCTION: NEW DEVELOPMENTS IN HUNTINGTON'S DISEASE RESEARCH. Elena Cattaneo, Dorotea Rigamonti, Donato Goffredo, Chiara Zuccato, Ferdinando Squitieri y Simonetta Sipione en *Trends in Neurosciences*, vol. 24, págs. 182-188, marzo de 2001.

LOSS OF HUNTINGTIN-MEDIATED BDNF GENE TRANSCRIPTION IN HUNTINGTON'S DISEASE. Chiara Zuccato y cols. en *Science*, vol. 293, págs. 493-498, 20 de julio de 2001.

Marea negra sobre Galicia

Repercusiones biológicas

Las condiciones meteorológicas en nuestro planeta hacen de las costas orientales de los océanos unos lugares que gozan de una fertilización extra a causa de los eventos estacionales de afloramiento. En esta situación se encuentran las aguas marinas próximas a Galicia, que convierten a sus rías en áreas altamente productivas, con un promedio de 260 gramos de carbono por centímetro cuadrado y año, el doble de lo que se produce en una sabana. Por otra parte, Galicia, encrucijada de fauna boreal y lusitánica, presenta una elevada biodiversidad. Una producción primaria alta, buena renovación del agua y riqueza de especies constituyen un patrimonio singular y son origen de una larga tradición en la explotación y manejo de los recursos marinos de los que, directa o indirectamente, vive buena parte de la población gallega.

Actualmente, todo ello está gravemente amenazado por la reciente catástrofe del petrolero *Prestige*. Sus tanques, con 68.000 toneladas de fuel, han originado, hasta el final del año 2002, tres mareas negras por el derrame de aproximadamente un tercio de su carga. La primera marea ocurrió durante el errático alejamiento del petrolero hacia mar abierto; la segunda, al partirse en dos antes de su hundimiento; y la tercera, al emerger a la superficie del océano el fuel a través de las fisuras en el casco del pecio, que yace a unos 3600 m de profundidad y 270 km al oeste de las islas Cíes.

El fuel que transportaba el *Prestige* tiene una composición elemental de 85,4 % C, 10,5 % H, 2,6 % S, 0,24 % N y algunos metales como Al, Fe, V, Zn y Ni, principalmente. Este producto se considera un combustible pesado por su alto contenido en hidrocarburos aromáticos (46 %), resinas y asfaltenos (35 %). Ello condiciona su comportamiento cuando se vierte en el agua o una vez que alcanza el litoral, ya que la escasa presencia de compuestos ligeros apenas supone una pérdida de hidrocarburos por disolución y evaporación. El vertido es algo menos denso que el agua marina y forma con ella una emulsión a partes iguales, que ha sido arrastrada por los vientos predominantes del sudoeste durante otoño e invierno. Este "mus de chocolate" se ha ido desplazando en la misma dirección que el viento y a un 3 o 4 % de su velocidad. Los temporales que acompañan a esos vientos durante esta época del año han fraccionado y dispersado los tres grandes vertidos, que alcanzaron la costa en forma de mantas de varios centímetros de espesor y cientos de metros cuadrados, pero también en forma de manchas de extensión variable, galletas y bolas, que afectaron a unos 200 km de litoral, desde Finisterre a La Coruña.



1. Mancha de fuel en el mar seguida por el buque Valdivia

La franja costera afectada se extendió unos 400 km hacia el sur tras la llegada de la tercera marea negra, dañando gravemente a las islas del recientemente creado Parque Nacional de las Islas Atlánticas Gallegas, así como a los frentes litorales desde la ría de Muros hasta la de Corcubión y desde cabo Silleiro hasta la desembocadura del Miño.

La penetración de los restos del vertido no afectó severamente al interior de la Rías Bajas, fundamentalmente debido a la barrera natural que forman las islas Cíes, Ons y Sálvora y a la acción decidida de los pescadores, bateeiros y mariscadores, que con sus embarcaciones y medios propios retiraron del agua los cúmulos de fuel.

No todos los restos de los vertidos han alcanzado la costa gallega, sino que una parte también fue transportada por la corriente de Navidad, que circula hacia el norte sobre el margen continental atlántico europeo a una velocidad de 5 a 15 km por día. Esta corriente ha dispersado las masas viscosas de fuel a lo largo de todo el Cantábrico, dejando su huella en algunas zonas rocosas y arenosas de su litoral.

La influencia de los compuestos contenidos en la mezcla orgánica que constituye el fuel puede plantearse considerando su presencia en tres compartimentos, agua, biota y sedimento, así como examinado los flujos que se establecen entre ellos. Este enfoque biogeoquímico proporciona una visión global y pluridisciplinar que puede vertebrar la labor a realizar para diagnosticar y paliar el efecto nocivo de la catástrofe.

En la columna de agua, el plancton, y particularmente el neuston, han debido ser afectados por el derrame; en primer lugar, por un inmediato efecto físico agudo de adherencia. La absorción de seres vivos en las masas viscosas de fuel habrá supuesto un incremento de la mortalidad en fase de huevo y de larva de numerosos organismos, algunos de ellos de interés comercial. El principal efecto de este incremento de la mortalidad sería un fallo en el reclutamiento, que afectaría, directa y negativamente, a la biomasa de las poblaciones. El efecto sobre las fases tempranas del desarrollo se manifiesta con cierto retraso en los subadultos y adultos. Las consecuencias serán más graves cuanto más se tarde en retirar todo el hidrocarburo del agua y de las costas, que es la tarea primordial en estos momentos.

En la interfase aire-agua el fuel ha afectado gravemente a las aves marinas residentes e invernantes en estas costas. Hasta ahora se están recuperando cerca de mil quinientas, lo que sugiere que han sido dañadas unas quince mil, entre ellas algunas de difícil recuperación como el arao común. Asimismo, entre los mamíferos marinos, el delfín mular y la marsopa han experimentado un fuerte impacto directo o indirecto, este último provocado incluso por las medidas de prevención y limpieza. Igualmente se han resentido las tortugas bobas, que siendo juveniles alcanzan las costas gallegas.

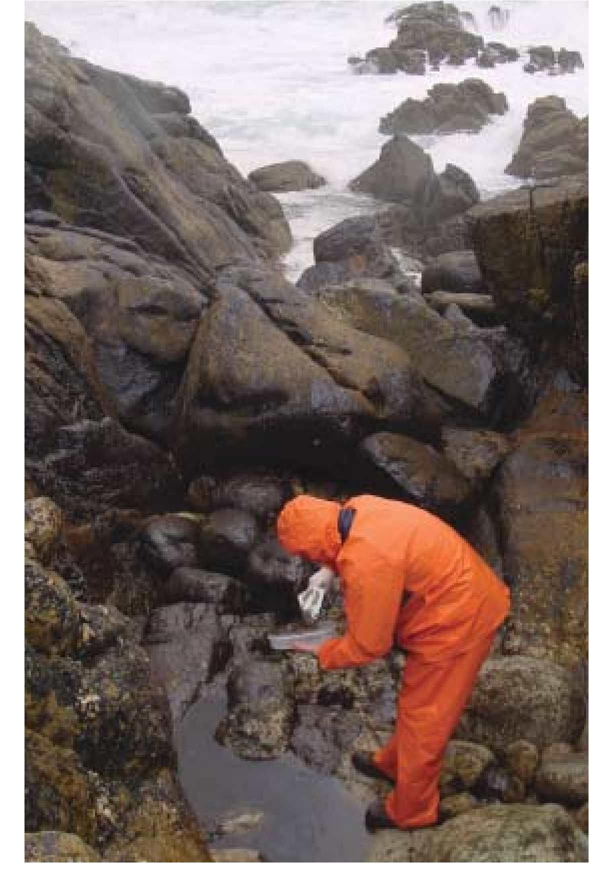
No obstante, dentro de la enorme catástrofe ecológica que significa este evento, lo menos malo es que haya ocurrido a finales del otoño, cuando todavía la producción primaria y secundaria, así como la actividad reproductora de la mayoría de las especies es baja. Para poder comprobar si existe o no una disminución de la abundancia de huevos y larvas por efecto del vertido, además de tener que realizarse muestreos después de que dejen de llegar oleadas de crudo a las costas, es necesario contar con datos históricos de referencia.

Por otra parte, además de las consecuencias ya reseñadas, pueden existir impactos más ocultos, aunque no menos importantes: los efectos ecotoxicológicos a medio y largo plazo. La presencia de hidrocarburos aromáticos en el agua puede provocar intoxicaciones y muertes rápidas al penetrar a través de las branquias o del tracto digestivo y también, de forma más lenta, actuando como depresores del sistema inmunitario de los organismos, lo que les dejaría expuestos y sin respuestas naturales eficaces ante infecciones víricas y bacterianas.

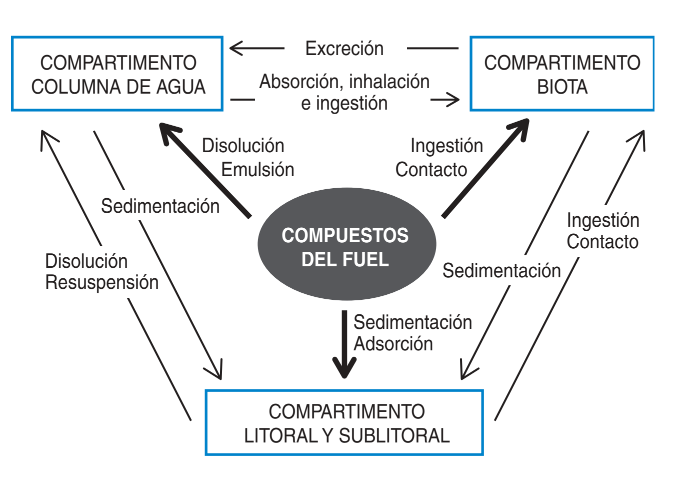
Si esta catástrofe hubiese acontecido en un mar cerrado como el Mediterráneo, sus efectos habrían sino prácticamente irreversibles, pero en el noroeste de la península Ibérica la hidrodinámica de sus aguas es muy alta favoreciendo la dispersión y lavado de los contaminantes en el sistema pelágico.

La mayor parte de los compuestos orgánicos del fuel son muy refractarios a la degradación y, por ello, muy persistentes. En el medio costero el "chapapote" se ha adherido a las rocas de la franja litoral y también se ha depositado sobre arenales. Las especies sésiles y de limitada capacidad de desplazamiento han sido exterminadas. Dos residentes habituales de la zona inferior rocosa de esta franja son los percebes y el mejillón. Los primeros constituyen el recurso básico de un grupo específico de mariscadores gallegos, y los segundos proporcionan la mayor parte de la semilla que se utiliza en las bateas de cultivo. Especies sedimentívoras propias de zonas arenosas, como navajas, almejas y otros bivalvos, aunque menos dañadas en conjunto, también han sido damnificadas. No sólo las especies comerciales han sido gravemente dañadas, sino que la variada biodiversidad de esta zona en algas, cnidarios, anélidos, moluscos, crustáceos, equinodermos y peces, han muerto o han visto profundamente lesionados su hábitat.

El daño causado por el vertido no sólo ha infrin-



2. Recogiendo muestras de fuel en el Roncudo (La Coruña)



3. Esquema de la presencia de los contaminantes en los tres compartimentos biogeoquímicos y sus flujos

gido el funcionamiento de los ecosistemas litorales, sino que también ha llegado a zona sublitoral próxima a la costa, donde el fuel ha arribado en forma discreta, formando galletas, bolas y rollos, que han afectado tanto a especies de interés económico (pulpo, choco, erizos, congrios, nécora, centolla, viera, etc.) como a numerosas especies no comerciales pero fundamentales para el equilibrio de las redes tróficas, tanto por contacto como por inhalación e ingestión. Queda por evaluar con detalle cuál ha sido el impacto global del vertido en estos ecosistemas, así como en la plataforma y el margen continental.

Actualmente es difícil predecir cómo se van a recuperar los ecosistemas ya que la carga del "Prestige" aún supone una amenaza, aunque las operaciones del batíscafo francés "Nautile" está intentando cerrar las grietas por donde fluye constantemente fuel, mientras se busca la mejor solución para eliminar esta fuente de contaminación.

Este tipo de accidentes siempre pueden ocurrir en zonas de intenso tráfico de buques. Lo fundamental es tener esto en cuenta. Para que existan medidas internacionales eficaces que protejan la salubridad de los océanos y costas, y planes nacionales, se requieren un buen conocimiento científico de las zonas sensibles, protocolos de actuación a todos los niveles y medios técnicos para hacerles inmediato frente.

ANGEL GUERRA
y RICARDO PREGO
Instituto de Investigaciones
Marinas (CSIC), Vigo

Los cannabinoides

¿Agentes antitumorales?

La marihuana (*Cannabis sativa* L.) se ha venido empleando en medicina desde hace cincuenta siglos, por lo menos. Hoy, sin embargo, constituye una práctica polémica, razón por la cual se halla bastante restringida la utilización clínica de la planta y de sus componentes activos (los cannabinoides).

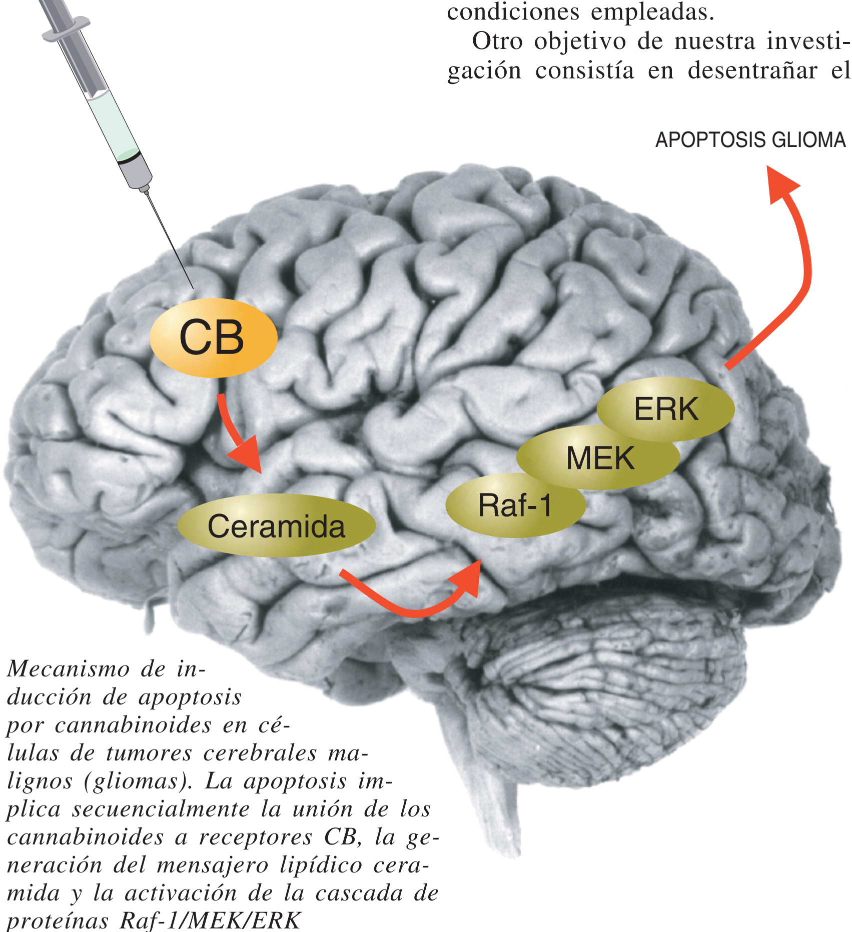
En España está autorizada la prescripción del cannabinoide natural D9-tetrahidrocannabinol (Marinol®) y el cannabinoide sintético nabilona (Cesamet®) para estimular el apetito e inhibir la nausea y el vómito en pacientes de sida o cáncer tratados crónicamente con quimioterapia.

Entre otros usos terapéuticos potenciales de los cannabinoides, cuyo estudio se encuentra en distintas fases clínicas, podríamos destacar el tratamiento del dolor, los trastornos del movimiento y los accidentes cerebrovasculares. Además, los cannabinoides inhiben el crecimiento de determinadas células cancerosas, lo que podría convertirlos en agentes antitumorales de interés clínico.

Hace unos cuatro años observamos que los cannabinoides inducían la muerte de células de glioma (el tipo de tumor cerebral más maligno) cultivadas en el laboratorio. Más tarde, inoculamos gliomas en ratas y ratones, ensayo que nos permitió sacar a la luz, en estos dos modelos, la acción antitumoral de los cannabinoides administrados localmente *in vivo*.

Desde el principio queríamos cerciorarnos de que el tratamiento con cannabinoides no producía efectos secundarios significativos. Observamos que el efecto antitumoral de los cannabinoides no implicaba una acción citotóxica general, pues la viabilidad de neuronas y células de glía en cultivo e *in vivo* no se veía afectada. Los análisis por resonancia magnética revelaron que el tratamiento con cannabinoides no inducía en el cerebro lesión alguna por necrosis, edema, infección, inflamación o trauma. Los parámetros hematológicos y la ganancia de peso fueron normales en los animales tratados. Demostramos, además, que la acción antitumoral la ejerce también un cannabinoide artificial; es decir, un cannabinoide modificado químicamente en el laboratorio para liberarlo de los efectos psicoactivos asociados al consumo de marihuana. En suma, la administración de cannabinoides parece ser segura en las condiciones empleadas.

Otro objetivo de nuestra investigación consistía en desentrañar el



Mecanismo de inducción de apoptosis por cannabinoides en células de tumores cerebrales malignos (gliomas). La apoptosis implica secuencialmente la unión de los cannabinoides a receptores CB, la generación del mensajero lipídico ceramida y la activación de la cascada de proteínas Raf-1/MEK/ERK

mecanismo a través del cual los cannabinoides inducen la muerte de las células de glioma. A tenor de lo observado, las características de este proceso no se correspondían con las de una muerte pasiva por necrosis, sino que recordaban el mecanismo de apoptosis. Sabido es que el organismo recurre a esta muerte celular programada para eliminar células innecesarias, dañadas o molestas.

Si andamos en la cierto, la apoptosis inducida por cannabinoides implica, en primer lugar, la unión de estos compuestos a proteínas receptoras específicas de la superficie celular (los receptores CB). La articulación conjunta genera distintas señales químicas dentro de la célula, entre ellas la acumulación de ceramida, una molécula de naturaleza lipídica que actúa como activadora de la proteína Raf-1, que a su vez activa a una segunda proteína (MEK) y ésta, a una tercera, la proteína ERK.

Se sabe que, en su forma activa, la quinasa ERK adquiere la capacidad de migrar al núcleo y modificar la expresión de genes que controlan la muerte celular, pero se desconoce la naturaleza precisa de los genes implicados en la apoptosis por cannabinoides.

Hasta ahora, la investigación avala la aplicación potencial de los cannabinoides en el tratamiento experimental de gliomas y quizá de otros tipos de tumores. Pero trasladar su uso a los humanos es asunto más delicado. Los estudios estadísticos revelan que la mayoría de los agentes antitumorales que se ensayan con éxito en animales no supera los ensayos clínicos. Y esto es especialmente cierto para los gliomas, que se encuentran dentro de los tumores más agresivos.

El tratamiento habitual de los gliomas es el quirúrgico, seguido de radioterapia, procedimientos por desgracia ineficaces o meramente paliativos que pueden alargar la vida del paciente de unos meses a uno o dos años. En medio de este panorama desolador, acaba de comenzar un ensayo clínico piloto encaminado a estudiar la posible eficacia de la aplicación intratumoral de D9-tetrahidrocannabinol en el tratamiento de gliomas en enfermos terminales que habían sido sometidos sin éxito a las terapias habituales. Somos conscientes de que curar un glioma es hoy en día imposible. Existen actualmente en marcha unos setenta ensayos clínicos sobre gliomas en el mundo, y en ellos se busca (como en el nuestro) una pequeña mejoría que abra la puerta a la esperanza de encontrar nuevas vías terapéuticas para combatir la patología. El tiempo nos dirá si los cannabinoides pueden contribuir a ello.

MANUEL GUZMÁN
Depto. de Bioquímica y Biología Molecular I, Universidad Complutense de Madrid

El brezal mediterráneo o *herriza*

Otra joya botánica y ecológica del Parque Natural Los Alcornocales

Los extensos alcornocales, los densos quejigares de valles profundos y los espectaculares bosques lauroides de gargantas angostas ("canutos") son las formaciones vegetales más conocidas de las sierras del Aljibe y del Campo de Gibraltar, en la provincia de Cádiz y el extremo occidental de la provincia de Málaga. La mayoría de estos bosques —sin duda los que presentan un mejor estado de conservación— se encuentran incluidos en el Parque Natural Los Alcornocales y han sido considerados recientemente como "el mejor bosque de España" por un grupo de prestigiosos naturalistas y científicos. Sin embargo, en esta región aparece además otro tipo de vegetación extendido localmente pero carente de árboles y, tal vez por ello, frecuentemente excluido de los trípticos informativos y guías para el visitante de este parque natural: el brezal mediterráneo o *herriza*.

Herriza es un término local para designar los brezales densos y de escaso porte que se desarrollan en las cumbres y crestas rocosas de las lomas y sierras del Aljibe y del Campo de Gibraltar sobre suelos derivados de areniscas silíceas oligo-miocénicas o "areniscas del Aljibe". Estos suelos, que vuelven a aparecer en las sierras de la península Tingitana (el lado marroquí del estrecho de Gibraltar), se caracterizan por su textura arenosa, acidez, pobreza en nutrientes y nivel elevado de aluminio soluble o disponible para las plantas. Tienen un característico color herrumbroso,



1. Herriza sobre una de las crestas de la Sierra del Niño (Tarifa, Cádiz). En un segundo plano, la Sierra de la Palma con sus laderas pobladas de bosques y sus cumbres y crestas tapizadas de herrizas. Al fondo se divisa el Peñón de Gibraltar

debido a la abundante presencia de óxidos de hierro (de ahí el nombre de herriza). Contrastan marcadamente con los suelos margo-calizos y arcillosos circundantes, más fértiles, de *p*H ácido o neutro y con poco aluminio, mucho más frecuentes en el conjunto de la cuenca mediterránea. Es decir, constituyen auténticas islas de suelos improductivos y tóxicos para las plantas rodeadas de un mar de suelos arcillosos y fértiles.

La herriza está formada principalmente por plantas arbustivas tolerantes a dichas condiciones edáficas adversas, como los brezos (*Calluna vulgaris*, *Erica australis* y *E. scoparia*), la robledilla (*Quercus lusitanica*) y algunas especies de jaras (*Cistus populifolius*, *Halimium alyssoides*) y aulagas (*Pterospartum tridentatum*, *Stauracanthus boivinii*, *Genista tridens*). Encontramos también otras especies, como *Drosophyllum lusitanicum*, menos abundantes, pero que constituyen auténticas joyas botánicas por su rareza geográfica; algunas de ellas restringidas exclusivamente a las herrizas de ambos lados del Estrecho (e.g. *Satureja salzmannii*, *Bupleurum foliosum*). La herriza se caracteriza, además, por la práctica ausencia de árboles, no sólo como consecuencia de la pobreza y escasez de los suelos, sino también por la exposición de las cumbres a los fuertes vientos de Levante, muy frecuentes en esta región.

A pesar de la existencia de conexiones florísticas con el brezal atlántico del oeste y noroeste de Europa, su riqueza de especies y niveles elevados de endemismo restringido confieren a estos brezales entidad propia como tipo de vegetación mediterránea. Sin embargo, la mayoría de los taxones pertenecientes a este elemento endémico —con la excepción del *Drosophyllum lusitanicum* o atrapamoscas, una fascinante especie de planta carnívora— no han sido hasta ahora suficientemente reconocidos, debido a su abundancia local y al infortunio de encontrarse a ambos lados del estrecho, en Europa y en Africa. Esto último los excluye de un posible abanderamiento político local o regional del que otras especies endémicas se han visto afortunadamente beneficiadas.



2. Herriza sobre una de las crestas de la Loma de Enmedio (Los Barrios, Cádiz). Los tonos rosados corresponden a individuos en flor de Erica australis

Pero tan destacable o más que sus niveles de diversidad y endemismo es la peculiaridad de sus patrones de endemismo. En primer lugar, las especies endémicas están estrechamente asociadas a las areniscas del Aljibe; es decir, se trata de un endemismo por aislamiento edáfico. Esto contrasta con el patrón de endemismo común a la mayoría de los "puntos calientes" de biodiversidad (*hot-spots*) de Europa y la cuenca mediterránea, asociado principalmente al aislamiento geográfico u orográfico; es decir, endemismo de islas oceánicas o de alta montaña.



3. Proliferación de individuos de la planta carnívora Drosophyllum lusitanicum *sobre un talud escarpado de arenisca. El color herrumbroso de esta roca y de sus suelos derivados es el responsable del término herriza*

En segundo lugar, entre las especies endémicas de la herriza existe una proporción significativamente elevada de especies arbustivas. Esto también constituye un contraste notable con otros puntos calientes del oeste de Europa, como Sierra Nevada, Pirineos o Los Alpes, donde hay una clara dominancia de plantas herbáceas entre sus especies endémicas. La pobreza de los sustratos, el clima mediterráneo suavizado y la condición de refugio de vida de la región del estrecho de Gibraltar durante las glaciaciones del Pleistoceno, debido a su baja latitud y altitud y a la influencia oceánica, pueden contribuir de manera conjunta a explicar este patrón de asociación del endemismo con el hábito arbustivo.

Esta marcada distinción en los patrones de endemismo —sumada a sus niveles notables de riqueza de especies y endemismo— convierte a la herriza en un tipo de vegetación único, no sólo en la península

Ibérica sino también en Europa y la cuenca mediterránea. Para volver a encontrar estos patrones de biodiversidad vegetal deberemos viajar varios miles de kilómetros hacia el sur, hasta la región del Cabo, en el extremo austral del continente africano. Allí se desarrolla un tipo de vegetación arbustiva conocida como *fynbos*, palabra afrikáner que significa brezal. Estos brezales sudafricanos se desarrollan sobre suelos arenosos, ácidos y pobres, y clima mediterráneo o semimediterráneo. La historia geológica de la región del Cabo se caracteriza por la suavidad de las glaciaciones del Pleistoceno debido a la fuerte influencia oceánica determinada por su posición geográfica. Esta semejanza en las condiciones edáficas y climáticas, así como en su historia evolutiva reciente, pueden haber sido responsables de la notable semejanza en los patrones de endemismo entre la herriza y el fynbos, recientemente propuesta como un posible fenómeno de convergencia entre ambos tipos de brezales mediterráneos.

A pesar de todo, el brezal mediterráneo es sistemática e incomprensiblemente olvidado en las revisiones y monografías científicas de brezales europeos. El brezal europeo no sólo no acaba en el noroeste de la península Ibérica, sino que más al sur, en la región del estrecho de Gibraltar, se encuentran los brezales más sobresalientes. Así mismo, a nivel local, las herrizas han sido tradicionalmente consideradas como un tipo de vegetación de escaso valor económico y paisajístico, debido a la pobreza de los suelos sobre los que se desarrollan y a la ausencia de árboles. La mayoría de los estudios botánicos llevados a cabo en el Parque Natural Los Alcornocales han ignorado estos brezales de cumbre o los han definido como meros estadios *preforestales* o etapas de *degradación* del bosque. Ello ha determinado que la herriza haya estado considerada —paradójicamente al amparo de la gestión y conservación de la biodiversidad— como una formación de vegetación susceptible de ser reforestada y *regenerada*.

Es cierto que la pérdida de árboles en alcornocales de ladera conlleva un aumento de la erosión del suelo y, si la roca madre es arenisca del Aljibe, una proliferación de especies tolerantes a estos suelos; es decir, se forman herrizas. Estas herrizas seriales o brezales de ladera se diferencian sensiblemente en su composición específica de los brezales de cumbre o verdaderas herrizas y se reconocen además por la existencia de ejemplares arbustivos o arbóreos aislados de alcornoque (*Quercus suber*). Dichos brezales de ladera pueden y deben ser reforestados. No debemos olvidar el también enorme valor florístico y paisajístico de los otros tipos de vegetación del Parque, además del elevado valor del alcornocal como recurso económico en la región. Pero las políticas de reforestación pasadas han ido mucho más allá de las laderas deforestadas, repoblando con alcornoques y, sobre todo, con pinos donde probablemente nunca los hubo: en las herrizas de crestas y cumbres expuestas. Las repoblaciones con alcornoque en estas herrizas suelen fracasar. Las repoblaciones con pinos (*Pinus pinaster*, *Pinus radiata*) no fracasan, pero están en su mayor parte abandonadas por su escaso rendimiento económico. Sin embargo, los efectos que los densos pinares abandonados tienen sobre la herriza son drásticos: el sotobosque literalmente se desploma bajo la sombra y la espesa alfombra de acículas ("pinocha") que estos pinares crean.

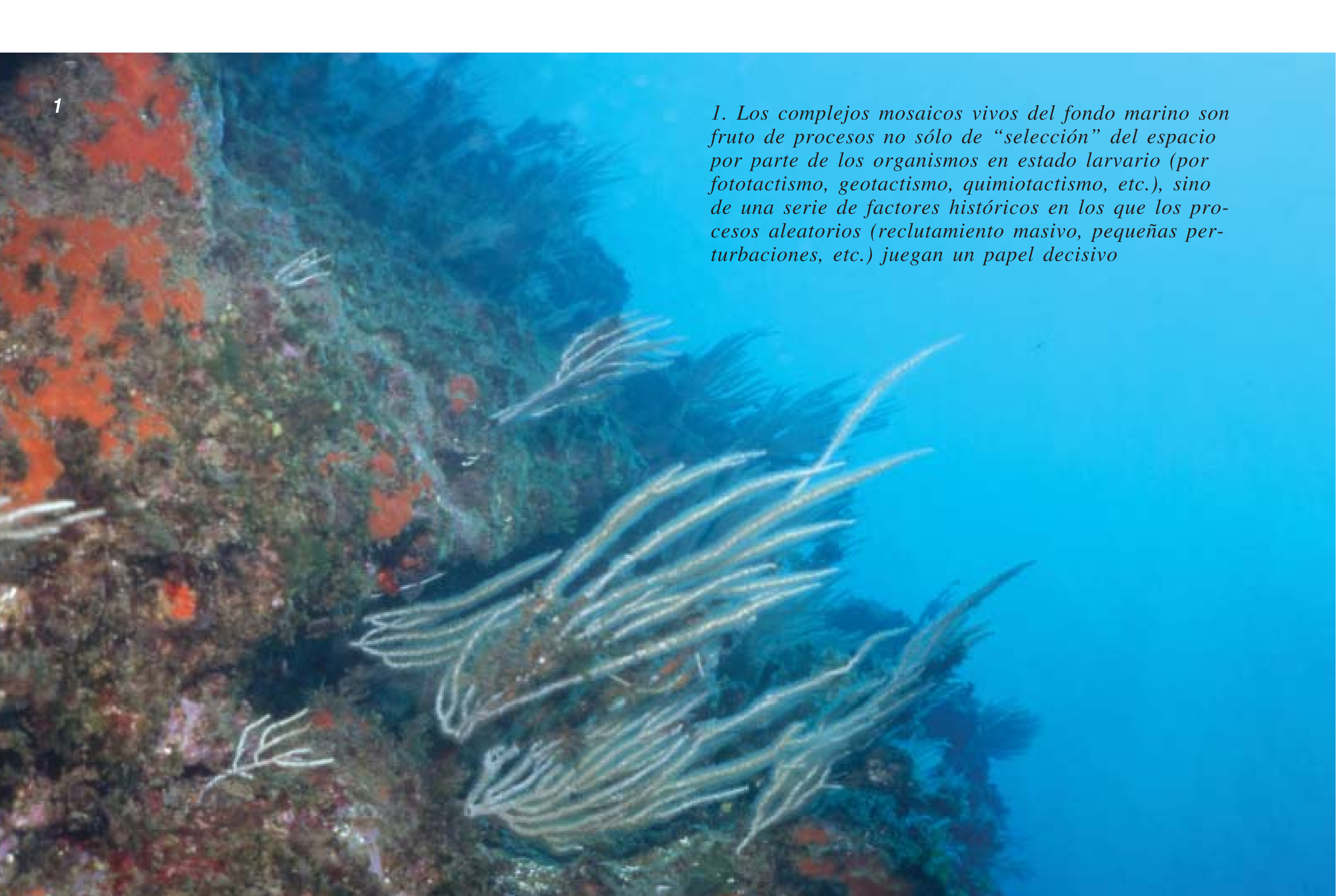
En resumen, la herriza o brezal mediterráneo de la región del estrecho de Gibraltar, cuyos ejemplos mejor conservados se encuentran en el Parque Natural Los Alcornocales, no es en modo alguno una vegetación degradada y sin valor de conservación. Sus niveles de diversidad y endemismo y, sobre todo, la particularidad de sus patrones de endemismo los convierten en un tipo de vegetación singular no sólo en la península Ibérica, sino en Europa y la cuenca mediterránea.

FERNANDO OJEDA COPETE
Dpto. de Biología,
CASEM,
Universidad de Cádiz,
Puerto Real

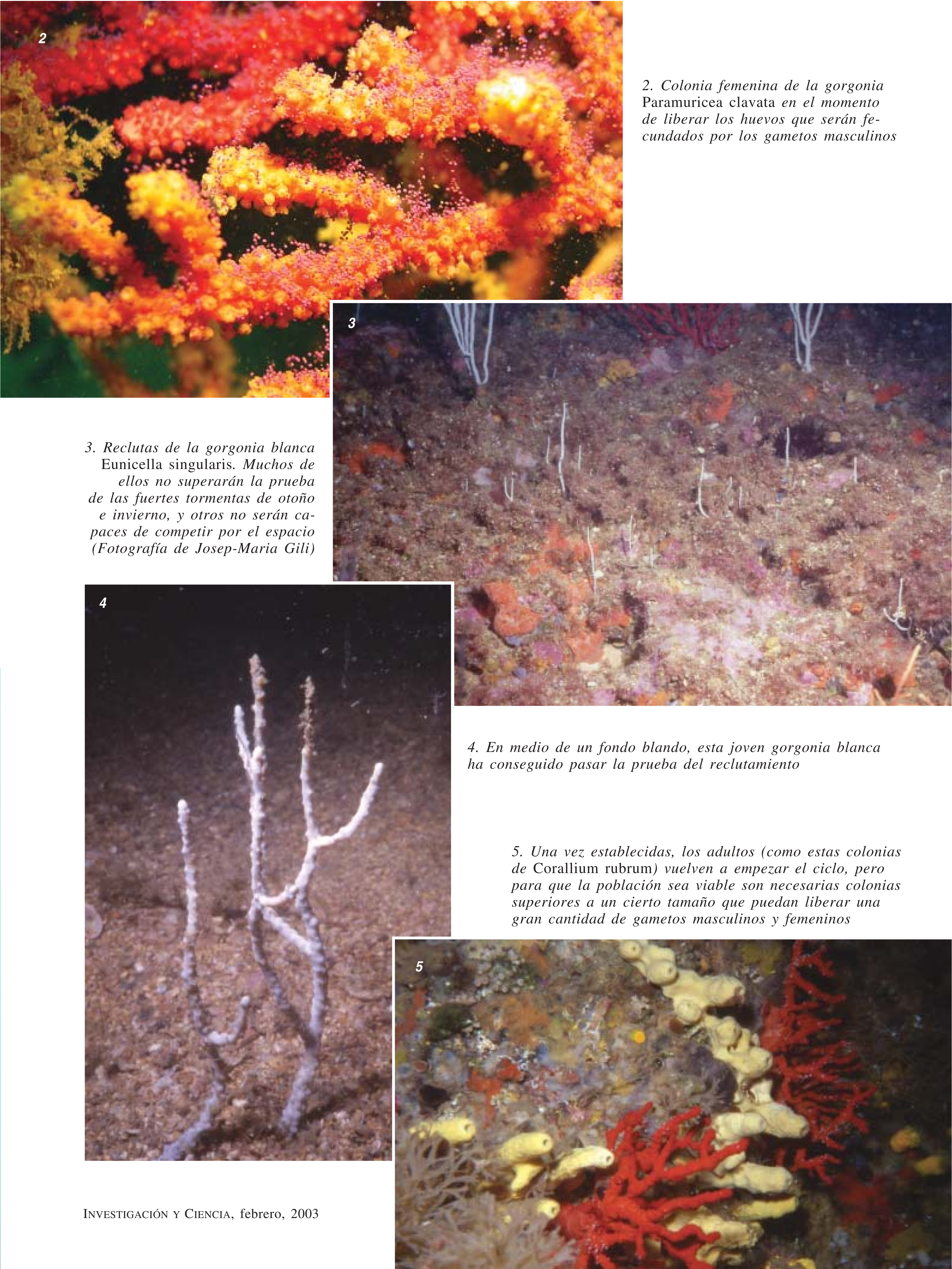
Texto y fotos: Sergio Rossi

Historia de una larva

La historia del asentamiento de un invertebrado sésil marino, como las gorgonias, es un proceso complejo. Tras la dilución que sufren los gametos masculinos en el medio líquido, alguno llega a destino fecundando las gónadas femeninas que se hallan en el interior (como la gorgonia blanca *Eunicella singularis* y el coral rojo *Corallium rubrum*) o en el exterior (como la gorgonia púrpura *Paramuricea clavata*) de los pólipos. En el caso de las gorgonias que "incuban" sus larvas, sólo una o dos saldrán del pólipo al exterior, liberadas de manera casi sincrónica entre finales de julio y principios de agosto en el Mediterráneo. La larva ha de conseguir desplazarse y pegarse a un sustrato favorable, perdido entre la "inmensidad" de sustratos posibles. No es sencillo encontrar un lugar apropiado para asentarse, pues los fondos blandos no son aptos para gran cantidad de especies (como anteriormente mencionadas), y constituyen hasta un 70 % del bentos. Es posible que en sustrato duro la larva encuentre otros organismos ya asentados, pero si encuentra un hueco o bien uno de los posibles competidores es más débil, tiene opciones de sobrevivir. Después viene uno de los momentos más duros, el pasar la primera temporada de otoño e invierno, donde las tramontanas o levantes de gran intensidad pueden acabar con gran cantidad de los reclutas recién asentados. Poco a poco crecen los recién llegados, siempre que encuentren alimento adecuado (como dieta) y suficiente (como cantidad) para poder subsistir y desarrollarse. Nunca dejan de competir por el espacio, y en su siguiente fase pasan al estado reproductor, que no es posible hasta que no tener una talla mínima en la mayoría de los organismos plurianuales como son las gorgonias. Las colonias así maduras producen gametos para empezar de nuevo el ciclo. Todos estos factores (que no son más que una concatenación de probabilidades) han de ser tenidos en cuenta para comprender la "suerte" de los residentes adultos de una comunidad por haber encontrado un lugar donde establecerse.



1. Los complejos mosaicos vivos del fondo marino son fruto de procesos no sólo de "selección" del espacio por parte de los organismos en estado larvario (por fototactismo, geotactismo, quimiotactismo, etc.), sino de una serie de factores históricos en los que los procesos aleatorios (reclutamiento masivo, pequeñas perturbaciones, etc.) juegan un papel decisivo



2. Colonia femenina de la gorgonia Paramuricea clavata *en el momento de liberar los huevos que serán fecundados por los gametos masculinos*

3. Reclutas de la gorgonia blanca Eunicella singularis. *Muchos de ellos no superarán la prueba de las fuertes tormentas de otoño e invierno, y otros no serán capaces de competir por el espacio (Fotografía de Josep-Maria Gili)*

4. En medio de un fondo blando, esta joven gorgonia blanca ha conseguido pasar la prueba del reclutamiento

5. Una vez establecidas, los adultos (como estas colonias de Corallium rubrum*) vuelven a empezar el ciclo, pero para que la población sea viable son necesarias colonias superiores a un cierto tamaño que puedan liberar una gran cantidad de gametos masculinos y femeninos*



LA DESINTEGRACION DEL HIELO a lo largo de las costas de la Antártida se ha venido compensando con las nevadas caídas en el interior. Pero se han obtenido indicios de que empieza a perderse más hielo que el que se acumula.

¿Sobre hielo quebradizo?

Si la capa de hielo de la Antártida Occidental se fundiese bruscamente, se producirían extensas inundaciones. Por fin va habiendo coincidencia en torno a la probabilidad de una pronta desaparición de la capa de hielo

Robert A. Bindschadler y Charles R. Bentley

Hace doce mil años, cuando la Tierra salía del último período glacial, los témpanos invadieron el Atlántico Norte. Arrancados de las enormes capas de hielo que cubrían la mitad de Norteamérica y Europa en aquella época, desplazaron agua suficiente para elevar el nivel global del mar más de un metro por año durante decenios.

Mientras el norte helado se fundía, el hielo que aprisionaba el continente meridional del planeta permanecía en muy buena medida intacto. Ahora representa el 90 por ciento del agua sólida del planeta. Pero los estudios científicos, que se cuentan por docenas, llevados a cabo durante los últimos 30 años vienen avisando de que con el hielo que cubre la Antártida Occidental podría suceder lo mismo que con los hielos del norte. (La Antártida occidental cae, en su mayor parte, en el hemisferio occidental.) Esa capa retiene más de tres millones de kilómetros cúbicos de agua dulce. Si se fundiera, elevaría el nivel mundial del mar cinco metros, se inundarían incontables llanos costeros y obligaría a sus dos mil millones de habitantes a buscar refugio tierra adentro.

Desde hace tiempo se acepta que los hielos continentales menguaron en el pasado, recorte que contribuyó a subir el nivel del mar, un proceso que no cesó ni siquiera tras la desaparición de las capas heladas septentrionales. Se admite, asimismo, que los hielos que cubren la porción oriental del continente son bastante más estables que los de la Antártida Occidental; en ésta las diferencias del suelo subyacente la convierten en región más errática. Pero hasta hace muy poco se discrepaba sobre la probabilidad de que se diera, en un futuro próximo, una destrucción catastrófica de la capa de hielo occidental. A muchos, incluido uno de los autores (Bindschadler), les preocupaba que las corrientes de hielo que fluían desde el interior del continente hacia el mar de Ross socavasen la integridad de la capa de hielo y condujeran a su derrumbe total en unos cuantos siglos, o antes incluso. Bentley, el otro firmante del artículo, subrayaba, igual que otros investigadores, la persistencia en épocas recientes de la capa; de ello inferían que disfrutaba de una estabilidad razonable.

Durante algún tiempo pareció que el debate no se resolvería nunca. La escasez de datos y la dificultad de estudiar un continente envuelto la mitad del año en una gélida oscuridad dificultaban la búsqueda de puntos de convergencia. Además, aunque algunas zonas de la capa de hielo sufrieron recortes muy rápidos en el pasado, cuesta determinar si las variaciones de tamaño o velocidad de los hielos que se observan hoy reflejan la variabilidad normal o el comienzo de un peligroso rumbo. En los últimos años, sin embargo, la investigación en el campo y en el laboratorio han ido fraguando un creciente acuerdo sobre las fuerzas que controlan el futuro de la Antártida Occidental. Se coincide ya en que las corrientes de hielo que se di-

GARY BRAASCH

rigen hacia el mar de Ross no encierran el peligro que temíamos.

Pero la perplejidad ante el destino final de la capa de hielo no ha desaparecido. Se ha puesto de manifiesto el adelgazamiento del hielo en cierto sector de la Antártida Occidental. Había pasado inadvertido. No se trata, parece, de que intervengan las corrientes de hielo, sino que opera un proceso destructor distinto. Y otra región —la península que forma el brazo más septentrional de la Antártida— experimenta en los últimos tiempos temperaturas de verano más altas. A ese calentamiento hemos de atribuir la desintegración hoy en curso de los hielos costeros.

Las temperaturas han subido en todo el planeta desde el final del último período glacial. Un proceso lento al comienzo, se ha acelerado desde mediados del siglo XX, con el aumento de la concentración atmosférica de gases de invernadero. De momento esa tendencia climática ha dejado su impronta sólo en dicha península. En otros puntos las temperaturas han subido menos, o incluso han bajado a lo largo de los últimos 50 años. Los investigadores se apresuran ahora a determinar si el calentamiento global no estará haciendo mella en el extremo sur del mundo.

Los autores

ROBERT A. BINDSCHADLER y CHARLES R. BENTLEY han dedicado la mayor parte de sus carreras científicas a la investigación de la capa de hielo de la Antártida Occidental y el continente que hay debajo. En los 23 años que ha pasado en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard, de la NASA, Bindschadler ha dirigido doce expediciones para la exploración de las tierras bajo la capa de hielo. Ha desarrollado numerosas técnicas de exploración remota para su aplicación en glaciología: la medida de la velocidad y espesor del hielo por medio de imágenes de satélites y la vigilancia de la fusión de la capa de hielo a partir de las emisiones de microondas, por citar sólo dos. La primera visita de Bentley a la Antártida Occidental duró 25 meses, durante los cuales dirigió una travesía de la capa de hielo como parte de la expedición del Año Geofísico Internacional de 1957-58. Regresó regularmente como miembro del departamento de geofísica de la Universidad de Wisconsin en Madison hasta su jubilación en 1998.

Alarma precoz

Los indicios de que la capa de hielo de la Antártida Occidental podría dirigirse a su desaparición se acumulaban desde hacía unos 30 años. En 1974, Johannes Weertman, de la Universidad del Noroeste, publicó un análisis teórico de la Antártida Occidental basado en las fuerzas que entonces se creía controlaban la estabilidad de las capas de hielo. Por aquella época, ya se sabía que la mayor parte de la tierra subyacente bajo la gruesa capa de hielo de la Antártida Occidental quedaba bastante por debajo del nivel del mar; tiempo atrás constituía el fondo de un océano. Si todo el hielo se convirtiera en líquido, aparecería un paisaje montañoso, con valles que se hundirían más de dos kilómetros por debajo de la superficie del mar y montañas que se elevarían otros tantos sobre dicho nivel. Al hallarse tan hundidos los bordes de la Antártida Occidental, sus hielos establecen un contacto muy extenso con el agua del mar. Una porción considerable de esos hielos se proyecta sobre la superficie del océano en forma de plataformas flotantes.

En su artículo, muy influyente, Weertman llegaba a la siguiente conclusión: cualquier plataforma de hielo que llene una cuenca marina es, en sí misma, inestable cuando el nivel global del mar va ascendiendo; de acuerdo con la mayoría, se ha producido ese fenómeno a lo largo de los últimos 20.000 años. Débese tal inestabilidad a la tendencia natural del hielo a flotar, que tensa los bordes de una capa de hielo marítima y es capaz incluso de alzarlos del sedimento subyacente. (En contraste, la capa de hielo de la Antártida Oriental descansa sobre un continente, la mayor parte del cual se eleva a considerable altura por encima de la acción deletérea del mar.) El sencillo cálculo de Weertman arrojaba que la capa de hielo de la Antártida Occidental se encaminaba hacia su total desintegración. Sólo un nuevo período glacial podía cambiar su sino.

Si Weertman anduviera en lo cierto, la actual capa de hielo constituiría una versión reducida de lo que fue. Tesis que recibía respaldo de numerosos descubrimientos anteriores. Los exploradores hallaron raros montones de rocas y restos (que sólo el hielo en movimiento podría haber creado) en laderas de montañas, muy por encima de la actual superficie del hielo; de esos hallazgos se desprendía que el hielo alcanzaba antaño mayor grosor. Por otra parte, unas trincheras profundas, excavadas en el suelo oceánico y lejos de la costa, señalaban que el borde de la capa de hielo que descansa sobre el fondo del mar se extendía en otros tiempos mucho más allá, hacia el interior del océano (*véase el recuadro* "¿Pasado, presente y futuro?"). Basándose en tales observaciones, muy limitadas,

Resumen/*El hielo antártico*

- Durante casi treinta años, se temió que la capa de hielo de la Antártida Occidental caminara hacia una rápida desintegración, que elevaría el nivel global del mar cinco metros en pocos siglos o incluso antes.
- Se cree ahora que el ritmo de retracción de la capa de hielo procede de una forma más lenta. En coherencia, se acepta como probable que el mar suba medio metro o menos de aquí a un siglo.
- Pero se trata de una hipótesis que hemos de admitir con ciertas reservas. Según parece, la capa de hielo del sector de Amundsen, poco estudiado, se va retrayendo más deprisa de lo que se preveía.
- El calentamiento global, que hasta ahora ha desempeñado un papel insignificante en el destino de la Antártida Occidental, ejercerá mayor influencia en el futuro.

¿PASADO, PRESENTE Y FUTURO?

DESDE EL APOGEO del último período glacial, hace unos 20.000 años, ha ido retrayéndose la gruesa cubierta de hielo de la Antártida (*abajo*). Aunque se trata de un progreso paulatino, se producen a veces episodios bruscos. La merma máxima de hielos ha correspondido a la Antártida Occidental. Allí la capa de hielo es harto más frágil que en la Oriental. Considerando que la capa occidental cambió de una forma rápida en el pasado, no podemos afirmar con seguridad si las recientes pérdidas de hielo, espectaculares, reflejan una pauta de variabilidad normal o si se trata, por el contrario, del inicio de su andadura hacia la desaparición. Si se produjera una desintegración catastrófica, la rápida subida del nivel de los mares inundaría las poblaciones costeras en todo el mundo.

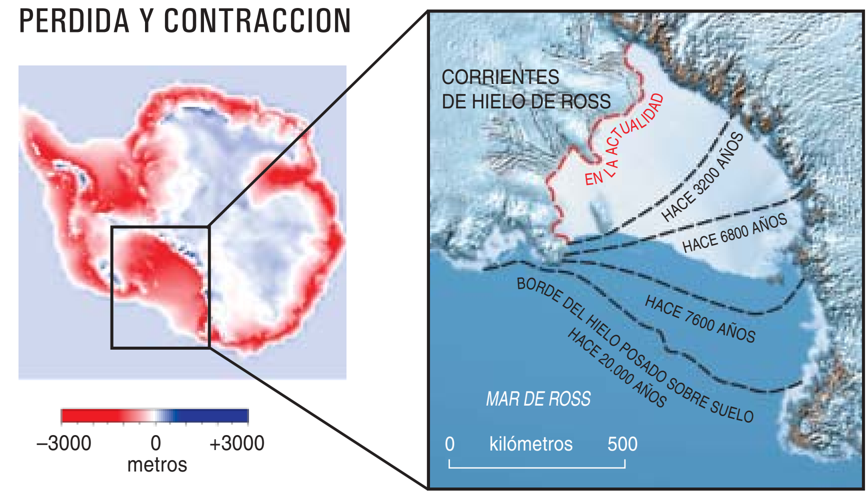
LA PENINSULA ANTARTICA.
Unica parte de la Antártida en la que sabemos que ha repercutido el calentamiento global

SUDAMERICA
Mar de Weddell
Barrera de hielo de Ronne
Corrientes de hielo de Ronne
Polo Sur
Glaciar de la Isla del Pino
Mar de Amundsen
Corrientes de hielo de Ross
Barrera de hielo de Ross
Glaciar Thwaites
Mar de Ross

ANTARTIDA OCCIDENTAL.
La capa de hielo es vulnerable a períodos de rápida desintegración; ha desaparecido al menos una vez en los últimos 600.000 años

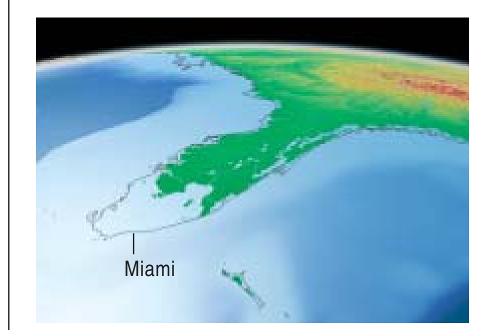
ANTARTIDA ORIENTAL.
La capa de hielo se ha mantenido en buena medida estable durante los últimos 15 millones de años

PERDIDA Y CONTRACCION



EL CAMBIO DEL ESPESOR de los hielos desde el último período glacial (*arriba, izquierda*) ha supuesto una pérdida (*rojo*) de unos 5,3 millones de kilómetros cúbicos, en gran parte en la Antártida Occidental. El borde de la capa de hielo que toca fondo marino ha retrocedido con particular rapidez en el mar de Ross (*detalle, a la derecha*) a lo largo de los últimos 7000 años; se ha retirado unos 700 kilómetros hacia el interior del continente.

EL PEOR DE LOS CASOS



LA DESINTEGRACION TOTAL de la capa de hielo de la Antártida Occidental elevaría el nivel del mar en cinco metros. Entre las víctimas se hallaría el sur de Florida (*arriba*); alrededor de un tercio de la península desaparecería bajo el agua. Hoy día, la Antártida Occidental causa un diez por ciento, más o menos, de la subida media de dos milímetros por año del nivel del mar.

DAVID FIERSTEIN (*mapa principal de la Antártida y mapa de la Barrera de Hielo de Ross*); ROBERT A. BINDSCHADLER (*mapa del espesor del hielo*); WILLIAM F. HAXBY (*mapa de Florida*)

Realidades complejas

LA PREDICCIÓN DE LA REACCIÓN de las capas de hielo antárticas al clima cambiante y de su influencia en el nivel del mar no siempre es sencilla. He aquí algunos de los fenómenos menos evidentes que deben tomarse en consideración:

No es preciso que el hielo se funda para que eleve el nivel del mar

El hielo que cubría antaño tierra firme contribuye al nivel global del mar en cuanto flota. Un iceberg —en su mayor parte bajo la superficie del océano— ya desplaza tanta cantidad de agua marina como cuando se funda. Ocurre lo mismo con las barreras de hielo, las lenguas congeladas flotantes que se extienden mar adentro desde los bordes de los continentes. Con las temperaturas bajísimas de la Antártida —34 grados bajo cero la media—, apenas si se funden sus hielos. Pero la situación podría cambiar si el calentamiento global la afectase más. Hasta ahora la Antártida influye sobre el nivel del mar sólo cuando el hielo sólido, arrastrado por los glaciares costeros o por cintas transportadoras naturales (corrientes de hielo), se incorpora a las plataformas de hielo preexistentes o se fragmenta.



UN ICEBERG FLOTANTE oculta su verdadero tamaño cuando se le ve desde arriba. El 90 % de su masa se esconde bajo su superficie.

El hielo puede acelerar o contrarrestar los efectos del calentamiento global

Pensemos en un campo nevado bajo un sol brillante. El hielo y la nieve devuelven al espacio mucha más energía solar que los océanos y la superficie continental. Esa reflexión facilita que una parte ya fría de la atmósfera, la que está sobre el hielo, se mantenga fría, aumentando la probabilidad de que se forme más hielo.

Si el calentamiento global calentase la atmósfera hasta fundir el hielo, quedarían al descubierto las superficies más oscuras que éste oculta. Entonces, la región absorberá mayor cantidad de energía solar y el aire se calentará todavía más.

El calentamiento global podría retrasar la subida del nivel del mar. También acelerarla

El aire caliente aumenta la evaporación de los océanos y transporta más humedad que el aire frío. Conforme se intensifica el calentamiento global, podría transportarse más agua de mar evaporada en las zonas templadas hasta las zonas polares; caería aquí en forma de nieve. Este proceso se reforzaría si el calentamiento global fundiera hielos marinos en cuantía importante y dejase una mayor parte de la superficie oceánica expuesta a la atmósfera. Si todo lo demás se mantuviera igual, el agua oceánica se conservaría en forma de nieve más deprisa de lo que tardaría en volver al mar; con ello, se frenaría algo la subida del nivel de éste. El problema está en que el calentamiento global llegue a fundir los hielos terrestres o se fragmenten a mayor velocidad. Del predominio de uno u otro proceso dependerá el efecto final sobre las capas de hielo que resulte del calentamiento global.

DAVID FIERSTEIN

algunos estimaron que la capa de hielo triplicaba en un principio su actual volumen y se contraía bastante despacio, a una velocidad que conduciría a su desaparición completa en 4000 o 7000 años.

Sólo se pensó que la Antártida Occidental pudiera estar abocada a una pronta desaparición cuando se observaron las corrientes de hielo; son éstas una especie de cintas transportadoras naturales de cientos de kilómetros de longitud y docenas de anchura. En un primer instante se atribuyeron, en parte, a unas fuerzas tectónicas que tienden a fracturar la Antártida Occidental, rebanar la corteza y permitir que escape una cantidad del calor interno de la Tierra superior al promedio. Este calor extra que se propagaría desde abajo podría fundir la base de la capa de hielo; crearía así una capa lubricante gracias a la cual el hielo descendería presto hasta por las laderas menos inclinadas. Las exploraciones aéreas, por medio de radares que penetran en el agua helada, descubrieron, en los años setenta, un fenómeno llamativo: dos redes de corrientes drenan hielo del interior del continente y lo depositan en las dos mayores barreras antárticas, la de Ross y la de Ronne. Una vez el hielo alcanza el borde marino de dichas barreras, acaba por desprenderse de las mismas en forma de grandes témpanos. Al tiempo que salía a la luz esta descripción dinámica de las corrientes de hielo, aparecían las primeras advertencias de que poseían la capacidad de drenar, entera, la capa helada en unos siglos, o incluso antes.

Corrientes inciertas

Espoleados por la nueva hipótesis de que el destino de la capa de hielo de la Antártida Occidental dependería de la celeridad con que esas corrientes extrajeran hielo del continente, en 1983 grupos de la NASA, de la Universidad estatal de Ohio y de la de Wisconsin en Madison establecieron un campamento de verano sobre las corrientes de hielo, o en su vecindad. Unos sondearon el interior mediante radares y exploraciones sísmicas; otros midieron su movimiento y deformación en superficie. No tardaron en

advertir que estos inmensos ríos de hielo son rapidísimos, en términos glaciológicos: corren a cientos de metros por año, centenares de veces la velocidad del glaciar de montaña medio.

En busca de una explicación de las velocidades de estas corrientes, se hicieron perforaciones de longitud kilométrica en el hielo para extraer muestras del antiguo suelo marino. Hay en su lecho conchas de organismos marinos aprisionadas en el suelo, mezcladas con piedrecillas, arcilla y roca erosionada, depositadas allí a lo largo de los milenios. Forman ahora un fondo fangoso, tan blando y bien lubricado que las corrientes de hielo se deslizan por su superficie con mayor suavidad que la imaginada por los primeros investigadores. Si en vez de tales testigos se hubiese encontrado rocas cristalinas, hubieran concluido que el rozamiento opuesto por ellas habría imposibilitado el movimiento de los hielos. Roca cristalina es lo que subyace bajo la mayoría de las masas de hielo continentales, entre ellas las de la Antártida Oriental.

Estos nuevos conocimientos dejaron en pie la posibilidad de un drenaje rápido a cargo de las corrientes de hielo de la barrera de Ross. Pero la investigación de las corrientes de hielo de la barrera de Ronne, al otro lado de la Antártida Occidental, revelaron que las perspectivas no eran ni de lejos tan pesimistas en su sector. Con todo, los científicos que acampaban en la proximidad de la barrera de Ross tenían razones para creer que, una vez que las corrientes de hielo de Ross se llevaran el millón de kilómetros cúbicos de hielo de esa región, caería a continuación el resto de la capa de hielo, incluida la zona drenada por las corrientes de Ronne y parte de la capa helada de la Antártida Oriental.

En los años noventa se observó otra peculiaridad de las corrientes de hielo de Ross que resultaba también inquietante. Además de rápidas, eran inconstantes. Los exámenes, por medio de radar, de la estructura oculta bajo la superficie helada que se asienta sobre tierra firme revelaron que las corrientes de hielo no estuvieron siempre donde se hallan ahora. Las imágenes de satélite de la barrera de Ross, compuesta por hielo que ha llegado allá en los últimos mil años, sacaron a la luz grietas y otros rasgos que sirven de archivo natural de cambios, violentos e inconfundibles, en las velocidades de las corrientes. La corriente “C” se detuvo de repente, al parecer, hace siglo y medio. No es muy distinta la desaceleración de la corriente de hielo de Whillans a lo largo de los últimos decenios. Si las corrientes iban y venían, según se deducía de tales descubrimientos, resultaría mucho más difícil predecir su futuro. Cabía la posibilidad, alarmante, de que las corrientes estancadas se pusieran a fluir de nuevo sin previo aviso. Pronto se desvaneció ese temor, al menos para un futuro próximo.

Hará unos cinco años, se recogieron datos que apuntaban la posibilidad de que la capa de hielo no hubiese menguado tanto como se había venido creyendo. En el año 2000, Eric J. Steig, de la Universidad de Washington, volvió a analizar, con nuevas técnicas, un testigo de hielo extraído en 1968 del corazón de la Antártida Occidental. De acuerdo con el primer análisis el hielo habría alcanzado 950 metros más de altura en el último período glacial que ahora. Sin embargo, Steig redujo, en su análisis más fino, la diferencia a 200 metros. John O. Stone, también de la Universidad de Washington, determinó la velocidad de adelgazamiento de la capa de hielo midiendo en la cordillera del Comité Ejecutivo los subproductos radiactivos de los rayos cósmicos; llevan desintegrándose a velocidad conocida desde el momento en que la retirada de los hielos dejó expuestos los afloramientos de rocas. Gracias a tales observaciones pudo acotarse el tamaño original de la capa de hielo; vendría a ser unas dos veces y media mayor su espesor actual.

A principios de 2001, todavía podían defenderse las dos hipótesis en torno al futuro de la capa de hielo de la Antártida Occidental. Para reconciliar pruebas sólidas, aunque contradictorias, se exigía aceptar la posibilidad siguiente: lo que constituye una gran variabilidad en escalas de tiempo pequeñas puede manifestarse como una variabilidad



GARY BRAASCH

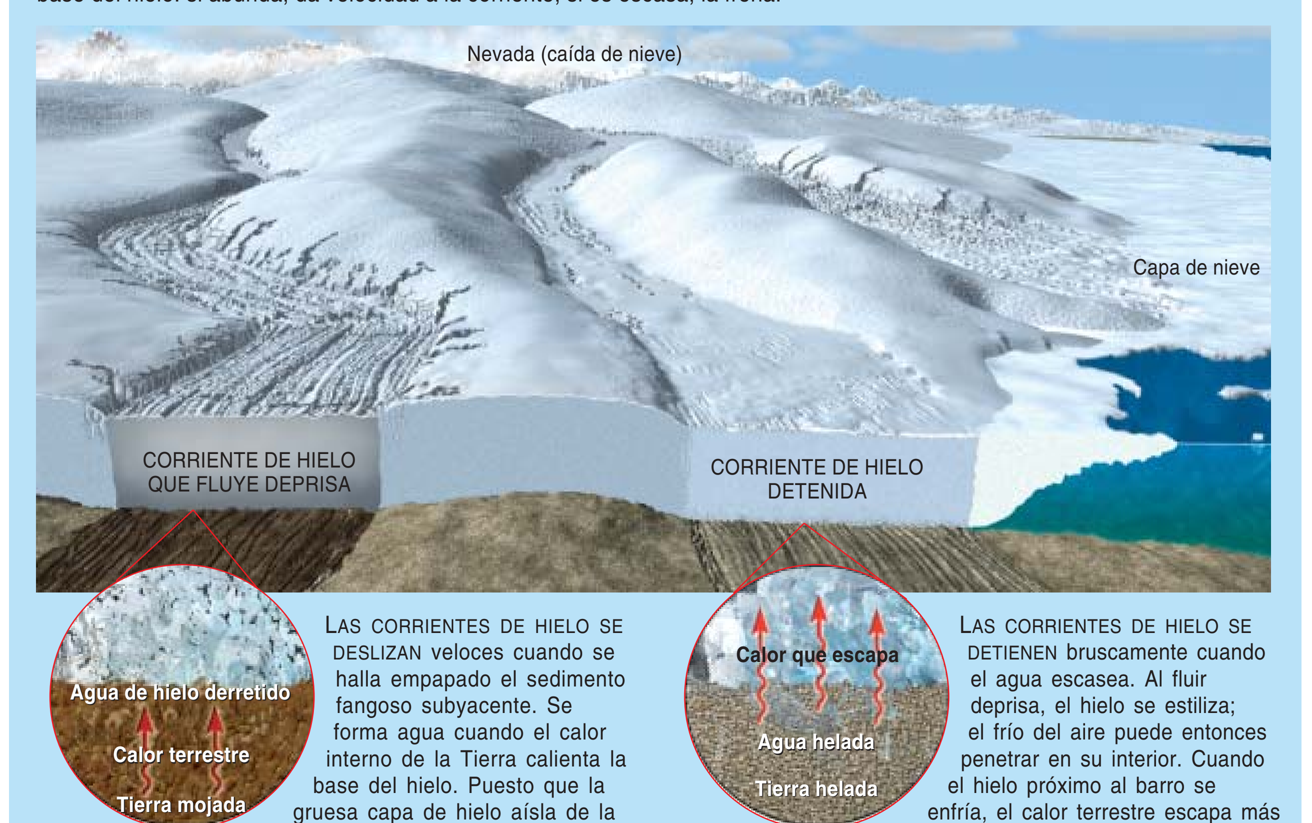
menor si se considera en escalas de tiempo importantes. Desde entonces, merced a una medición más precisa del movimiento de las corrientes de hielo de Ross, se ha confirmado que las nevadas van cayendo en general al mismo ritmo que se pierde hielo en ese sector. El conjunto, pues, apenas si merma. Y a fines de 2001 se llegó a un convencimiento común: las corrientes de Ross *no* están rebanando el hielo. Las nevadas parecen haber compensado las pérdidas de hielo a lo largo del último milenio. Dicho de otro modo, no hay visos de que la capa de hielo suba el nivel de los mares con repentinas aportaciones en la cuantía que algunos esperaban.

La naturaleza dinámica de las corrientes de hielo restringe el acuerdo en cuestión a la explicación de qué es lo que está sucediendo ahora. Las pruebas geológicas en la vecindad de la base norteamericana de McMurdo señalan allí una célere retirada de los hielos hace 7000 años. Hemos de admitir, pues, la posibilidad de que haya habido desapariciones regionales de este tipo, aunque sólo hayan persistido breves períodos. Podrían producirse de nuevo.

Para aprehender mejor cuál pueda ser la futura estabilidad de la capa de hielo, se ha ahondado en el conocimiento de las fuerzas que gobiernan el movimiento del hielo dentro de las corrientes. Podemos explicar por qué se detienen, arrancan y cambian de velocidad en diferentes escalas de tiempo las corrientes (*véase el recuadro* “Deslizamiento y desaparición”). El sedimento y el agua del fondo del mar conservan el control en el intervalo de días y años; ahora bien, a escala temporal de milenios domina el clima global, a través, sobre todo, de la acción de la temperatura del aire y del nivel del mar. Con esta nueva

DESLIZAMIENTO Y DESAPARICION

INMENSAS CORRIENTES DE HIELO lo transportan hasta las costas de la Antártida Occidental, a una velocidad de cientos de metros por año. Aportan más de 400 kilómetros cúbicos de hielo anuales a las barreras de hielo. Podrían así acabar con la capa de hielo en 7000 años, o antes, si las nevadas no compensaran la pérdida. Hay indicios, sin embargo, de suspensiones de las corrientes durante largos períodos. Que se detengan o cursen depende de la cantidad de agua líquida existente en la base del hielo: si abunda, da velocidad a la corriente; si es escasa, la frena.



LAS CORRIENTES DE HIELO SE DESLIZAN veloces cuando se halla empapado el sedimento fangoso subyacente. Se forma agua cuando el calor interno de la Tierra calienta la base del hielo. Puesto que la gruesa capa de hielo aísla de la fría atmósfera a las capas más profundas, el sedimento llega a calentarse tanto, que derrite la base de la corriente. Esa agua fundida impregna el sedimento, que se reblandece muchísimo y se desparrama bajo el peso del hielo suprayacente.

LAS CORRIENTES DE HIELO SE DETIENEN bruscamente cuando el agua escasea. Al fluir deprisa, el hielo se estiliza; el frío del aire puede entonces penetrar en su interior. Cuando el hielo próximo al barro se enfría, el calor terrestre escapa más deprisa hacia la superficie y no tiene tiempo de fundir el hielo de la base. Esta pérdida de calor congela el agua del barro, lo endurece y lo vuelve pegajoso. A menos que el agua de la corriente superior mantenga la tierra maleable, la corriente se irá frenando hasta detenerse.

DAVID FIERSTEIN

información y la que habrá de llegar podremos elaborar modelos informáticos más fidedignos del comportamiento de las corrientes en los siglos venideros.

El talón de Aquiles antártico

Constituye motivo de tranquilidad el saber que la zona de la capa de hielo de la Antártida Occidental drenada por las corrientes de hielo de Ross no se halla en peligro de desaparición inminente. Pero en el último par de años ha quedado claro que no todas las secciones de la Antártida Occidental siguen una misma pauta. Mientras los investigadores de campo concentraban sus esfuerzos en las corrientes de hielo que alimentan las barreras de hielo de Ross y Ronne, varios sensores instalados en satélites recogían datos de la región contigua al mar de Amundsen, otra parte, bastante desconocida, de la capa de hielo. Se ha comprobado que están desapareciendo los glaciares allí a una velocidad todavía mayor que la que se había supuesto en un principio para las corrientes de hielo de Ross.

Tras un estudio exhaustivo de millones de mediciones de la altura del hielo, tomadas desde el espacio durante los años ochenta y noventa, Duncan J. Wingham, del Colegio Universitario de Londres, y H. Jay Zwally, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales, demostraron, cada uno por su lado, que las porciones de la capa de hielo que alimentan los glaciares de la Isla del Pino y de Thwaites están perdiendo grosor; en el segundo caso, más de 10 centímetros por año. Estos resultados casan a la perfección con un estudio reciente de Eric Rignot, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena. Gracias a la interferometría de radar, capaz de detectar movimientos de los hielos de sólo unos milímetros, observó que ambos glaciares depositan hielo con creciente rapidez en el mar de Amundsen *y* se contraen hacia el interior del continente. De ese modo

contribuyen en la actualidad con 0,1 o 0,2 milímetros por año a la elevación general del nivel del mar, un diez por ciento del total. A ese ritmo, los glaciares drenarían un 30 por ciento de la capa de hielo en 7500 o 15.000 años; mucho antes, si se produjera una catástrofe como la que se temía antaño para el sector de Ross.

Estos resultados nuevos no han sorprendido a ciertos glaciólogos. Hace tiempo, Terence J. Hughes, de la Universidad de Maine, llamó al sector de Amundsen "el talón de Aquiles de la capa de hielo de la Antártida Occidental". Pero las limitaciones logísticas han desalentado durante docenas de años las observaciones sobre el terreno; se trata de parajes muy nubosos y alejados de cualquier base permanente de investigación. Además, las propiedades únicas de los glaciares del mar de Amundsen quizás impidan aplicar allí los conocimientos adquiridos en el mar de Ross. Las superficies de los glaciares descienden hacia el mar con mayor pendiente que las corrientes de hielo, por ejemplo. Y como los glaciares arrojan su hielo directamente al mar en lugar de añadirlo a una plataforma de hielo preexistente, hay quienes sostienen que esta región quizá se halle más adelantada en el proceso de desintegración que cualquier otra parte de la Antártida.

El aumento de las temperaturas

El grado de vulnerabilidad real del sector del mar de Amundsen constituye una más de las varias incógnitas pendientes de investigación. El calentamiento global podría acercarse hacia el Polo Sur desde la península Antártica, donde la temperatura atmosférica de verano se ha elevado ya más de dos grados desde mediados del siglo XX. Hasta cambios mínimos de temperatura podrían desencadenar la desintegración de plataformas de hielo que en la actualidad parecen bastante estables. En 2002 se obtuvieron indicios de que la mezcla con aguas oceánicas más cálidas, procedentes de latitudes inferiores, podría estar acelerando la fusión de los bordes en contacto con el suelo y estar reduciendo la



GARY BRAASCH

cantidad de hielo en el mar de Amundsen.

Para nuestra fortuna, la plataforma de hielo de la Antártida Occidental posee más realimentaciones útiles (por ejemplo, la que consiguen la suspensión durante siglos de las corrientes rápidas de hielo) que las que tenían las norteamericanas o europeas. La desaparición de ésta se produjo hace tiempo de un modo brusco, a raíz del calentamiento de unos pocos grados. Pero la mayor parte de los hielos de la Antártida Occidental sobrevivieron. El modelo de Weertman simplificó en exceso la dinámica de las capas de hielo, que hasta ahora han ejercido suficiente control sobre su propio tamaño como para evitar, o al menos mantener a raya, una rápida desaparición.

Podemos, pues, aventurar con todas las cautelas que la plataforma de hielo seguirá contrayéndose, en un proceso que se prolongará miles de años. El efecto medio de la Antártida Occidental en el nivel del mar podría duplicar su contribución histórica de dos milímetros por año; esta capa de hielo añadiría un metro más al nivel del mar cada 500 años. Mas conviene no olvidar que esta singular capa de hielo lleva sorprendiendo a los investigadores más de 30 años, y no parece que esté todo dicho.

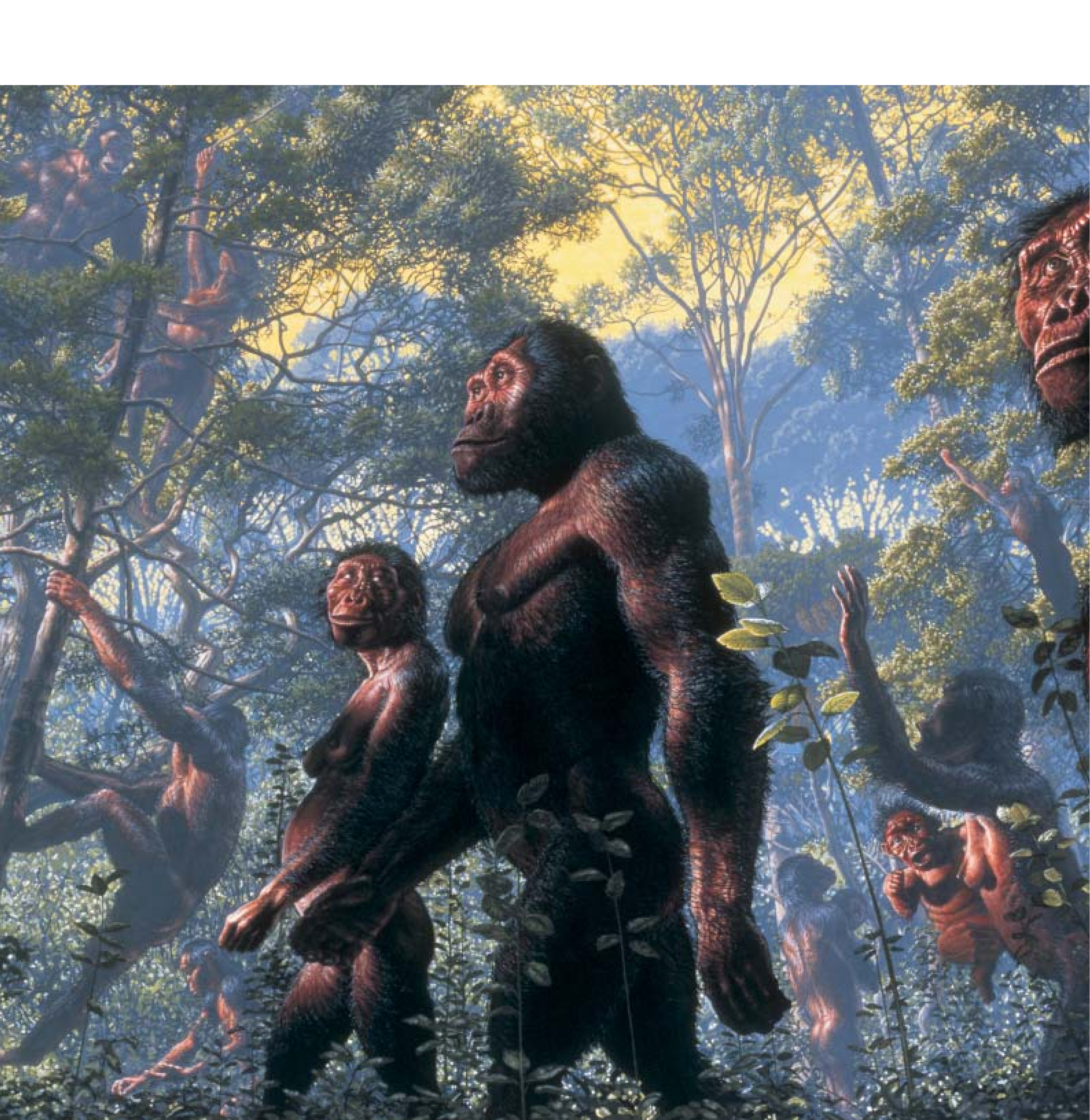
Bibliografía complementaria

RAPID SEA LEVEL RISE SOON FROM WEST ANTARCTIC ICE-SHEET COLLAPSE? Charles R. Bentley en *Science*, vol. 275, págs. 1077-1078; 21 de febrero de 1997.

FUTURE OF THE WEST ANTARCTIC ICE SHEET. Robert Bindschadler en *Science*, vol. 282, páginas 428-429; 16 octubre 1998.

THE WEST ANTARCTIC ICE SHEET: BEHAVIOR AND ENVIRONMENT. Dirigido por Richard B. Alley y Robert A. Bindschadler. Antarctic Research Series, vol. 77, American Geophysical Union, 2001.

Incidencia de la dieta en la hominización



Los cambios operados en el régimen alimentario han constituido una fuerza motriz de la evolución humana

William R. Leonard



Los seres humanos son primates un tanto extraños. Presentan una postura erguida, poseen un cerebro voluminoso y han colonizado todos los rincones del planeta. Los antropólogos llevan mucho tiempo tratando de saber cómo se diferenció del resto de los primates nuestro linaje. A lo largo de los años se han propuesto todo tipo de hipótesis para explicar el origen de nuestras singularidades. Pero las pruebas que se recogen apuntan con insistencia creciente en una misma dirección, según la cual las peculiaridades del hombre descritas se hallarían unidas por un hilván; resultarían, en buena medida, de procesos de selección natural que procuraron maximizar la calidad de la alimentación y el rendimiento en la búsqueda de los recursos. Según parece, los cambios en la disponibilidad alimentaria, a lo largo del tiempo, ejercieron una influencia determinante en los homínidos. Expresado en un contexto evolutivo, somos lo que comemos.

Por lo tanto, nuestra dieta constituye una diferenciación más que nos separa de los otros primates. No hay población humana hoy en el mundo que no siga un régimen más rico en calorías y sustancias nutritivas que el de nuestros parientes más próximos, los simios antropomorfos. ¿Cuándo y cómo los hábitos alimentarios de nuestros antepasados comenzaron a divergir de los del resto de los primates? ¿Hasta qué punto nos hemos alejado de las pautas alimentarias ancestrales?

El interés científico en la evolución de los requerimientos nutritivos de nuestra especie cuenta con una larga tradición. Pero la investigación se intensificó a raíz de la publicación, en 1985, del artículo "Nutrición paleolítica". Apareció ese texto fundamental en *New England Journal of Medicine* y lo firmaban S. Boyd Eaton y Melvin J. Konner, de la Universidad Emory. Sostenían que la difusión, en las sociedades modernas, de muchas enfermedades crónicas (obesidad, hipertensión, enfermedades coronarias y diabetes) obedecía al alejamiento de nuestra alimentación del tipo de dieta que había evolucionado para una población de cazadores-recolectores prehistóricos. En los 18 años transcurridos desde ese estudio pionero, hemos avanzado mucho en el conocimiento de las necesidades nutricionales humanas. Hoy sabemos que la evolución nos ha moldeado de suerte tal que no dependiéramos de una sola dieta paleolítica, sino que fuéramos flexibles en los hábitos alimentarios. Tal adquisición presenta implicaciones importantes.

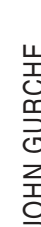
1. RECREACION IDEAL de una escena, fechada hace unos 3,5 millones de años y protagonizada por *Australopithecus afarensis*, antepasado de los seres humanos. El grupo busca alimentos vegetales en un bosque africano.

JOHN GURCHE





2. LOS RESTOS DEL ESQUELETO nos muestran que hace unos cuatro millones de años nuestros más remotos antepasados, los australopitecos, eran bípedos. En *A. afarensis* (*a la derecha*), uno de los primeros homínidos, las características que lo demuestran son el arco plantar del pie, el dedo gordo del pie no oponible y algunos rasgos de la rodilla y de la pelvis. Pero estos homínidos retenían algunas características primitivas (piernas cortas, brazos largos y falanges del pie curvadas, entre otras), que indican que probablemente no caminaban igual que nosotros; debían de pasar algún tiempo en los árboles. Hasta la aparición de nuestro género *Homo* (*la figura de la izquierda corresponde a un representante actual*), no surgieron las proporciones modernas de miembros y de pies y la forma de la pelvis necesaria para caminar erguidos.



Para comprender el papel de la alimentación en la evolución humana, debemos recordar que la obtención de comida, su consumo y su utilización en diversos procesos biológicos son aspectos fundamentales de un ser vivo. La dinámica energética entre los organismos y su entorno (es decir, la energía gastada con respecto a la energía adquirida) comporta consecuencias adaptativas para la supervivencia y la reproducción. Estos dos componentes de la adaptación darwiniana se reflejan en la forma en que un animal divide su reserva. La energía de mantenimiento es la que necesita para sobrevivir día a día. La energía productiva se asocia a la generación y cuidado de la prole; en los mamíferos, debe ésta tomar en consideración las necesidades añadidas de la madre durante la gestación y la lactancia.

El entorno influye en la forma en que el individuo reparte la energía entre mantenimiento y producción. Unas condiciones hostiles imponen costes de mantenimiento superiores. Sin embargo, el objetivo de todos los organismos es el mismo: dedicar suficiente cantidad de energía a la reproducción para asegurar el éxito a largo plazo de la especie. Así, analizando de qué modo los animales obtienen la energía y la distribuyen, entenderemos mejor la vía seguida por la selección natural en su determinación de los cambios evolutivos.

Adquisición del bipedismo

Sin excepción, los primates no humanos deambulan sobre las cuatro extremidades. De ahí que se dé por sentado que el último antepasado común de los humanos y de los chimpancés (nuestro pariente vivo más próximo) fuera cuadrúpedo. No sabemos exactamente cuándo vivió ese último antepasado común, pero existen indicios claros de locomoción bípeda (la característica que distingue los antepasados humanos de otros simios) en *Australopithecus*, que vivió en Africa hace unos cuatro millones de años. En la bibliografía paleoantropológica abundan las hipótesis sobre el origen de la locomoción bípeda. C. Owen Lovejoy, de la Universidad estatal de Kent, propuso en 1981 que la locomoción sobre las dos extremidades inferiores liberaba los brazos para transportar a las crías y los alimentos recolectados. En fecha más cercana, Kevin D. Hunt, de la Universidad de Indiana, defendía que surgió porque permitía obtener alimentos a los que antes no se llegaba. Según Peter Wheeler, de la Universidad John Moores de Liverpool, desplazarse erguido permitía a los homínidos regular mejor la temperatura corporal, porque así exponían menos superficie corporal al abrasador sol africano.

La lista sigue. En realidad, para primar por vía selectiva este tipo de locomoción, tuvieron que intervenir, a buen seguro, varios factores concomitantes. Basado en las investigaciones realizadas con mi

esposa Marcia L. Robertson sostengo que nuestros antepasados se hicieron bípedos, en parte, porque ese tipo de locomoción resulta, desde el punto de vista energético, menos costosa que la locomoción cuadrúpeda. Nuestros análisis del coste energético del movimiento en animales actuales de diferentes tamaños muestran que, en líneas generales, los mejores indicadores del coste energético son el peso del animal y la velocidad de desplazamiento. De la locomoción bípeda humana llama la atención su coste energético, muy inferior al de la cuadrúpeda.

A los simios antropomorfos no les resulta barato andar por el suelo. Los chimpancés, que emplean una forma muy peculiar de locomoción cuadrúpeda, el "caminar de nudillos", gastan alrededor de un 35 % más de calorías durante la locomoción que un mamífero cuadrúpedo ordinario del mismo tamaño (por ejemplo, un perro grande). Quizá las diferencias en el ambiente evolutivo expliquen semejante disparidad entre seres humanos y simios antropomorfos. Chimpancés, gorilas y orangutanes evolucionaron, y continúan viviendo, en bosques densos donde como mucho han de desplazarse un par escaso de kilómetros al día para obtener suficiente alimento. Por el contrario, la mayor parte de la evolución de los primeros homínidos se produjo en zonas de bosques abiertos y en praderas, donde resulta más difícil hallar sustento. Las sociedades actuales de cazadores y recolectores que viven en ambientes así, y que representan el mejor modelo de los patrones de subsistencia de los humanos primitivos, suelen cubrir distancias de diez a trece kilómetros cada día para encontrar comida.

Estas diferencias en los desplazamientos diarios repercuten de una forma decisiva en la locomoción. Puesto que los simios antropomorfos recorren distancias cortas cada día, para ellos las potenciales ventajas energéticas de una forma de locomoción eficiente son muy pequeñas. En el caso de seres que han de cubrir un radio largo, sin embargo, una deambulación eficiente consiente ahorrar muchas calorías, que podrán sustraerse del simple mantenimiento para dedicarlas a la reproducción. La selección de una forma de movimiento eficiente, desde el punto de vista energético, se nos ofrece más probable en los animales que efectúen mayores desplazamientos; saldrán más beneficiados de ello.

En el grupo de los homínidos que vivieron entre hace 5 y 1,8 millones de años, durante el Plioceno, dicha revolución morfológica vino instada por el cambio climático. A medida que el continente africano se hacía más seco y las sabanas se extendían a expensas de los bosques, los recursos alimentarios se distribuían con una discontinuidad creciente. En este contexto, la locomoción bípeda puede considerarse una de las primeras estrategias en la evolución de la nutrición humana: un tipo de locomoción que redujo drásticamente el número de calorías empleadas en buscar unos recursos alimenticios cada vez más dispersos.

Resumen/*La alimentación y la evolución humana*

- Las características distintivas del hombre que le separan del resto de los primates debiéronse en buena medida a la selección natural. Operó ésta en una mejora de la calidad de la dieta y en un mayor rendimiento en la obtención de los alimentos. Para ciertos autores, muchos de los problemas de salud que afectan a las poblaciones actuales son consecuencia de un alejamiento de la dieta actual respecto de la que seguían nuestros antepasados paleolíticos.
- Sin embargo, el estudio de poblaciones que mantienen todavía un estilo de vida tradicional nos pone de manifiesto que el hombre puede ahora cubrir sus exigencias nutricionales mediante una amplia variedad de estrategias alimentarias. La evolución habría privilegiado la flexibilidad en la dieta. Los problemas de salud de las sociedades industriales, que tienen a su alcance alimentos con muchas calorías, no se deben a que nos hayamos apartado de una dieta específica, sino al desequilibrio entre la energía asociada a la dieta y la consumida.

El autor

WILLIAM LEONARD es profesor de antropología en la Universidad del Noroeste. Se doctoró en 1987 en antropología biológica por la Universidad de Michigan en Ann Arbor. Ha estudiado grupos de campesinos indígenas de Ecuador, Bolivia y Perú y pueblos pastores de Siberia central y del sur.

Grandes cerebros y homínidos hambrientos

En cuanto los humanos perfeccionaron su locomoción, empezó el siguiente acontecimiento fundamental de su evolución: el desarrollo del tamaño cerebral. De acuerdo con el registro fósil, los australopitecos no alcanzaron un cerebro mucho mayor que el de los simios antropomorfos. Sólo experimentaron un incremento modesto, de unos 400 centímetros cúbicos, hace cuatro millones de años, a 500, dos millones de años más tarde. En cambio, el volumen cerebral de *Homo* pasó de los 600 centímetros cúbicos de *Homo habilis*, hace unos dos millones de años, a los 900 centímetros cúbicos en los primeros *H. erectus*, sólo 300.000 años más tarde. El cerebro de *H. erectus* no alcanzó el tamaño humano actual (en promedio 1350 centímetros cúbicos), pero superó al de los primates no humanos.

Un aspecto extraordinario de un cerebro voluminoso es el de la cantidad de energía que consume: unas 16 veces lo que gasta el tejido muscular por unidad de peso. Ahora bien, aunque la relación de tamaño cerebral a peso corporal sea, en el hombre, mayor que en el resto de los primates (el triple de lo que cabría esperar), el metabolismo basal humano no es superior al de los otros mamíferos de las mismas dimensiones. En efecto, debemos destinar una fracción notable de nuestro suministro energético diario al funcionamiento del cerebro: el metabolismo del cerebro en reposo representa del 20 al 25 por ciento de la demanda energética de un adulto humano (mucho más que el 8-10 % observado en los primates no humanos, no digamos ya

Tiempo (millones de años de antigüedad)

Porcentaje de energía en reposo consumida por el cerebro

Chimpancé actual
400 cc

A. boisei
500 cc

Homo habilis
600 cc

A. africanus
415 cc

Australopithecus afarensis
385 centímetros cúbicos

H. erectus
900 cc

H. sapiens antiguo
1150 cc

H. sapiens actual
1350 cc

3. EN EL CURSO DEL TIEMPO se produjo un aumento de volumen cerebral. Ese proceso supuso una mayor demanda energética. Los cerebros de los humanos actuales requieren entre un 10 % y un 12 % más de la energía basal respecto a la exigida por un australopiteco.

que el 3-5 % que asignan al cerebro otros mamíferos).

Utilizando la estimación del tamaño corporal de los homínidos realizada por Henry M. McHenry, de la Universidad de California en Davis, Robertson y yo hemos calculado la proporción del metabolismo basal que habrían necesitado nuestros antepasados para mantener sus cerebros. Hemos llegado a las cifras siguientes: un australopiteco de 35-40 kilogramos de peso con un cerebro de 450 centímetros cúbicos debía de destinar al funcionamiento de éste alrededor del 11 % de su energía basal. Por otro lado, *H. erectus*, que pesaba alrededor de 55-60 kilogramos y contaba con un cerebro de unos 900 centímetros cúbicos, pondría a su disposición alrededor de un 17 % de su energía basal (es decir, unas 260 de las 1500 kilocalorías diarias).

¿Cómo evolucionó un cerebro tan costoso en energía? A tenor de la teoría propuesta por Dean Falk, de la Universidad estatal de Florida, la bipedia permitió el enfriamiento de la sangre en el cerebro homínido. De ese modo se liberó al cerebro —muy sensible al calor— de unas limitaciones de temperatura que habrían impedido su crecimiento. Pienso que, como en el caso de la locomoción bípeda, participaron varios factores. Pero la expansión del cerebro no fue posible antes de que los homínidos adoptaran un tipo de dieta tan rica en calorías y nutrientes que cubriese sus necesidades.

La investigación de lo que ocurre entre los animales actuales apoya esta afirmación. Entre los primates, las especies con un cerebro mayor comen alimentos más nutritivos; el hombre constituye el ejemplo extremo de dicha correlación, puesto que presenta el mayor volumen cerebral y la dieta más completa [*véase* "Dieta y evolución de los primates" por Katharine Milton; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre, 1993]. De acuerdo con los análisis de Loren Cordain, de la Universidad estatal de Colorado, los cazadores y recolectores actuales obtienen, en promedio, el 40-60 % de su energía de alimentos de origen animal (carne, leche y otros productos derivados), frente al 5-7 % de los chimpancés. Los alimentos de origen animal contienen, en paridad de peso, más calorías y sustancias nutritivas que los vegetales. Por ejemplo, 100 gramos de carne proporcionan 200 kilocalorías; en tanto que la misma cantidad de fruta proporciona sólo de 50 a 100 kilocalorías, para quedarse en 10-20 las hojas. Resulta, pues, verosímil, que los seres humanos primitivos alcanzaran mayor volumen cerebral consumiendo alimentos más ricos en energía.

Los fósiles revelan también que la mejora en la calidad de la dieta acompañó al desarrollo evolutivo del cerebro. Todos los australopitecos tenían características esqueléticas y dentarias adaptadas para el consumo de alimentos vegetales coriáceos y de baja calidad. Sus representantes más avanzados, los australopitecos robustos (una línea extinta del árbol familiar de los homínidos, contemporánea de miem-



4. LOS AUSTRALOPITECOS ROBUSTOS, representados aquí a la izquierda por *A. boisei* alcanzaron adaptaciones manifiestas a una ingestión de alimentos vegetales duros y fibrosos. Por el contrario, *H. erectus* (*a la derecha*) evolucionó para comer alimentos blandos y de mayor calidad energética; debía de alimentarse de carne con regularidad.

bros de nuestro género), habían adquirido rasgos evidentes para masticar vegetales fibrosos: rostros macizos y discoidales, mandíbulas muy potentes, cresta sagital en la parte superior del cráneo para la inserción de vigorosos músculos masticadores, y molares robustos con un esmalte muy grueso. (No significa eso que los australopitecos nunca comieran carne. Sin duda la consumían ocasionalmente, como los chimpancés actuales.) En cambio, los primeros miembros del género *Homo*, que descendían de los australopitecos gráciles, tenían caras mucho más pequeñas, mandíbulas más delicadas, molares menores y carecían de cresta sagital, a pesar de que su cuerpo era mucho mayor que el de sus predecesores. Este conjunto de características indica que los primeros *Homo* consumían menos vegetales y más alimentos de origen animal.

Sobre las causas que provocaron que *Homo* adoptase la dieta de mayor calidad necesaria para el desarrollo del cerebro, parece que también los cambios ambientales influyeron. La creciente aridez del paisaje africano redujo la cantidad y la variedad de alimentos vegetales comestibles a disposición de los homínidos. Los que se encontraban en la línea evolutiva que condujo a los australopitecos robustos afrontaron este problema con recursos morfológicos: adquirieron especializaciones anatómicas que les permitieron sobrevivir con alimentos difíciles de digerir, aunque más frecuentes.

La línea evolutiva que desembocó en *Homo* recorrió otro camino. La extensión de la sabana también incrementó la presencia de mamíferos de pasto, como los antílopes y las gacelas; aparecieron nuevas oportunidades para los homínidos que fueran capaces de explotarlos. *H. erectus* lo consiguió. Creó la primera economía de cazador-recolector. La captura de animales se convirtió en uno de los fundamentos de la alimentación; los recursos se distribuían entre los componentes del grupo. De ese cambio de comportamiento nos habla el registro arqueológico, que nos ofrece un aumento de los huesos de animales en los yacimientos de homínidos durante este período, además de las pruebas y señales de despiece con útiles líticos.

Estos cambios en la dieta y en el comportamiento asociado a ella no convirtieron a nuestros antepasados en carnívoros exclusivos. Sin embargo, la adición de pequeñas cantidades de alimentos de origen animal a su dieta, combinada con la repartición de los recursos, común en los grupos cazadores-recolectores, aumentó la calidad y la estabilidad de su alimentación. Esta mejora no constituye por sí sola la razón de que los cerebros de los homínidos crecieran, pero parece haber desempeñado un papel decisivo en que ese cambio fuera posible. Tras un primer aumento de tamaño cerebral, resulta verosímil una mutua interacción entre dieta y expansión cerebral: cerebros mayores produjeron comportamientos sociales más complejos, que condujeron

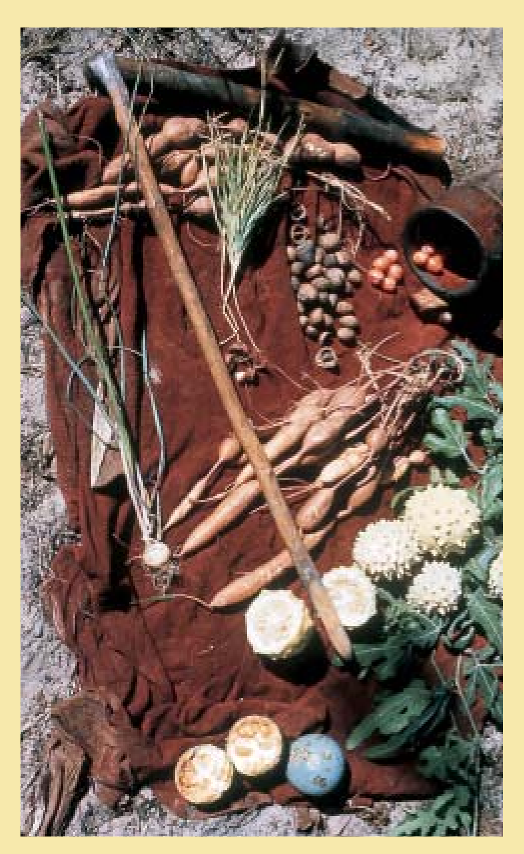


EN EL FUEGO

Consumir alimentos de origen animal es una de las maneras de elevar la densidad de calorías y nutrientes en la alimentación. Un cambio, tal parece, fundamental en la evolución humana. Pero, ¿podrían haber mejorado de otra forma nuestros antepasados la calidad de lo que comían? El equipado dirigido por Richard Wrangham, de la Universidad de Harvard, ha examinado recientemente la importancia de la preparación de los alimentos en la evolución humana. Han demostrado que cocinar no sólo vuelve los alimentos vegetales más blandos y fáciles de digerir, sino que también incrementa su contenido energético disponible, especialmente en los tubérculos con almidón, como las patatas o la mandioca. Las enzimas del cuerpo humano no pueden digerir las moléculas de los almidones en estado bruto. Pero, calentados, estos complejos de hidratos de carbono se hacen más digeribles y proporcionan una mayor cantidad de calorías.

Piensan esos investigadores que *Homo erectus* debió de ser el primer homínido en utilizar el fuego para cocinar, hará quizás unos 1,8 millones de años. Gracias a la preparación de alimentos de tipo vegetal (especialmente los tubérculos), esta especie desarrolló dientes más pequeños y cerebros mayores que los de sus predecesores. Además, las calorías extra hicieron posible que *H. erectus* dedicara más tiempo a la caza (actividad que requiere mucha energía).

Aunque desde una perspectiva energética se trata de un razonamiento impecable, las pruebas arqueológicas con que el equipo de Wrangham defiende su hipótesis carecen de solidez suficiente. Para señalar que *H. erectus* controlaba el fuego citan unos yacimientos del este de Africa, Koobi Fora y Chesowanja, que datan de hace 1,6 y 1,4 millones de años respectivamente. Exhiben, en efecto, indicios de fuego, pero caben dudas acerca de si los homínidos fueron los responsables de encenderlo o domeñarlo. Las pruebas inequívocas más antiguas del uso del fuego (hogares con piedra y huesos quemados de animal en yacimientos europeos) tienen sólo 200.000 años de antigüedad.



LA COCCION DE LOS VEGETALES, especialmente los tubérculos, propició la expansión cerebral, según Richard Wrangham y su equipo, de la Universidad de Harvard.

a cambios en las tácticas de obtención de alimentos y mejoras en la dieta, que a su vez fomentaron la evolución del cerebro.

Migración alimentaria

La evolución de *H. erectus* en Africa hace 1,8 millones de años también señaló un tercer cambio profundo en la evolución humana: la emigración inicial de los homínidos desde Africa. Hasta hace poco, la ubicación geográfica y la antigüedad de los yacimientos arqueológicos indicaban que los primeros miembros del género *Homo* permanecieron algunos centenares de miles de años en Africa, antes de aventurarse, poco a poco, fuera de su territorio de origen y dispersarse por el resto del Viejo Mundo. Según investigaciones precedentes, las mejoras en la técnica lítica de hace alrededor de 1,4 millones de años (en concreto, la aparición de los bifaces del Achelense) permitió a los homínidos salir de Africa. Pero los hallazgos más recientes indican que aparición y dispersión de *H. erectus* fueron fenómenos casi simultáneos. El equipo encabezado por Carl Swisher III, geocronólogo de la Universidad de Rutgers, ha mostrado que los yacimientos de *H. erectus* más antiguos que se conocen fuera de Africa, situados en Indonesia y en la República de Georgia, tienen entre 1,8 y 1,7 millones, lo que corrobora la simultaneidad mencionada.

Tras estas ansias por ver nuevos mundos parece hallarse, una vez más, la alimentación. Lo que come un animal determina la extensión de territorio que necesita para sobrevivir. Los animales carnívoros requieren por lo general espacios mucho mayores que los herbívoros de talla pareja por una sencilla razón: disponen de menos calorías por unidad de área.

H. erectus, con un tamaño corporal respetable y una dependencia mayor de los alimentos de origen animal, necesitaba mucho más espacio que los pequeños australopitecos dependientes de una dieta vegetariana. A partir de datos de primates y poblaciones de cazadores-recolectores actuales, Robertson, Susan C. Antón, de la Universidad de Rutgers, y el autor han estimado que el mayor tamaño corporal de *H. erectus*, unido al incremento moderado en el consumo de carne, hizo necesario que se multiplicara entre ocho y diez veces su predio respecto al precisado por los últimos australopitecos (lo suficiente para explicar la rápida expansión de esta especie fuera de Africa). No cono-

I. DEVORE *Anthro-Photo File*

cemos con exactitud hasta dónde debió de alejar del continente un cambio así a *H. erectus*, pero seguramente lo arrastraron a tierras remotas las manadas de animales migratorios.

Cuando los seres humanos se trasladaron a latitudes más septentrionales, tropezaron con nuevas dificultades alimentarias. Los neandertales, que vivieron durante las últimas glaciaciones en Europa, fueron los primeros seres humanos que habitaron ambientes de tipo ártico; hubieron de aumentar la cantidad de calorías que ingerían para sobrevivir bajo estas condiciones. Podemos obtener alguna pista sobre sus requerimientos energéticos a partir de los datos de las poblaciones humanas actuales que, con modos de vida tradicional, moran en zonas septentrionales. Los evenki, pastores siberianos de renos, estudiados por Meter Katzmarzyk, de la Universidad Queen's de Ontario, y Victoria A. Galloway, de la Universidad de Toronto, y los inuit (esquimales) del ártico canadiense tienen un metabolismo basal un 15 % más alto que los individuos, de talla similar, que viven en latitudes más templadas. Las actividades, mucho más costosas desde el punto de vista energético, asociadas a la vida en un clima boreal elevan todavía más el requerimiento calórico. Así, un hombre de 75 kilogramos de un país industrializado sólo necesita alrededor de 2600 kilocalorías al día, mientras que un enjuto evenki de 56 kilos requiere más de 3000 kilocalorías al día para vivir. Con estos parámetros de poblaciones nórdicas actuales, Mark Sorensen, de la Universidad del Noroeste, y el autor han calculado que los neandertales necesitarían unas 4000 kilocalorías al día para sobrevivir. Que fueran capaces de satisfacer estas demandas energéticas nos habla de sus grandes aptitudes para obtener alimento.

Problemas actuales

Del mismo modo que la exigencia de mejorar la calidad de la dieta influyó en la evolución humana inicial, factores análogos desempeñaron una función crucial en el incremento, más reciente, del tamaño de la población. La cocción de los alimentos, la agricultura e incluso ciertos aspectos de la técnica moderna de la alimentación pueden considerarse tácticas innovadoras para potenciar la calidad de la dieta humana. En primer lugar, la cocción aumentó la energía disponible en las plantas silvestres. Con el advenimiento de la agricultura, el hombre empezó a manipular especies marginales para incrementar su producción, digestibilidad y contenido nutritivo (principalmente, convirtiendo a las plantas en alimentos más parecidos a los de origen animal). Toda esta serie de transformaciones continúa hoy en día con la modificación genética de plantas cultivadas que producen "mejores" frutos, vegetales y cereales. De forma similar, el desarrollo de suplementos líquidos nutritivos y de barras alimenticias es la continuación de la tendencia que nuestros antepasados iniciaron: obtener el mayor aporte energético a partir de la menor cantidad posible de alimento y con el menor esfuerzo físico.

Consideradas en su conjunto, tales estrategias han resultado efica-

CAZADORES NEANDERTALES

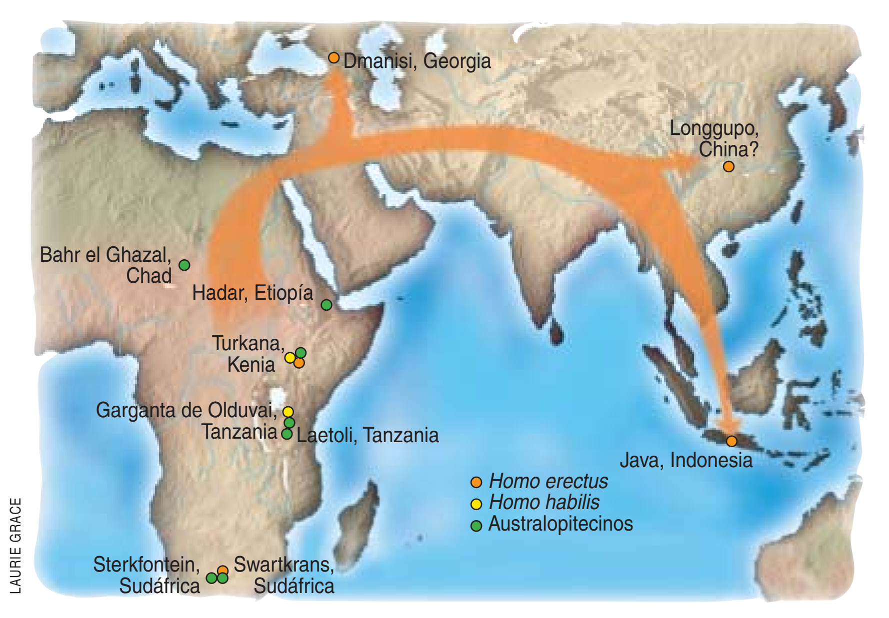
Para reconstruir lo que comían los seres humanos prehistóricos se acostumbraba estudiar los dientes y huesos craneales fosilizados, los restos arqueológicos de actividades relacionadas con la alimentación y la dieta de individuos humanos y primates actuales. Ahora se recurre cada vez más a otra fuente de información: la composición química de los huesos fósiles. Este enfoque ha proporcionado interesantes descubrimientos sobre los neandertales.

Michael Richards, ahora en la Universidad de Bradford, en Inglaterra, y sus colaboradores analizaron recientemente los isótopos de carbono (^{13}C) y de nitrógeno (^{15}N) de huesos de neandertales con 29.000 años de antigüedad, procedentes de la cueva de Vindija (Croacia). La proporción relativa de estos isótopos en la parte proteínica de los huesos humanos (el colágeno) guarda relación directa con la proporción de proteína en la dieta de cada individuo. De esta forma, comparando los marcadores isotópicos de los huesos de los neandertales con los de animales que vivían en el mismo entorno, se ha podido establecer que los neandertales obtenían proteínas de una dieta preferentemente animal. Los análisis muestran que los neandertales de Vindija tenían niveles de ^{15}N similares a los de carnívoros como los zorros o lobos. Algunos trabajos anteriores dieron a entender que la ineficacia en la consecución de alimento pudo ser una de las causas de la extinción de los neandertales. Pero Richards sostiene que, para consumir tanto alimento de origen animal como parece que consumían, tuvieron que ser unos cazadores muy hábiles. Estos y otros resultados inducen a pensar que el comportamiento alimentario de los neandertales era harto más complejo de lo que se venía proponiendo.



LOS NEANDERTALES comían sobre todo carne (de reno, por ejemplo), según el análisis químico de los huesos.

HELLIO & VAN INGEN *Photo Researchers, Inc.*



5. EL EXODO AFRICANO se puso en marcha en cuanto apareció el *H. erectus*, hará 1,8 millones de años. Una de las razones debió de ser su necesidad de disponer de territorios donde alimentarse mayores que los de sus predecesores, a los que superaba en tamaño.

ces: la especie humana no se ha extinguido. Pero quizás el testimonio más elocuente de la importancia de los alimentos ricos en energía y en nutrientes, a lo largo de la evolución humana, se encuentra en que muchos de los problemas sanitarios que afrontan todas las sociedades tienen relación con las desviaciones de la dinámica energética que nuestros ancestros establecieron. En el caso de los niños en las poblaciones rurales de los países pobres, la dieta de baja calidad provoca un desarrollo corporal deficiente y mayores tasas de mortalidad durante los primeros años de vida. Los alimentos que se suministran a los niños durante y después de la lactancia no bastan, ni en energía ni en nutrientes, para cubrir las necesidades de este período de rápido crecimiento y desarrollo. Aunque estos niños nacen con una talla y un peso parecidos a los de otros niños de los países industrializados, a los tres años son mucho más bajos y pesan menos; vienen a ser como el 2-3 % de los niños de su edad y sexo en naciones avanzadas.

En las sociedades industriales nos encontramos con el problema opuesto: la obesidad abunda cada vez más en niños y en adultos. Obedece ese fenómeno al consumo de alimentos ricos en energía (sobre todo, grasas y azúcares) que se adquieren fácilmente y no son caros. De acuerdo con estimaciones recientes, más de la mitad de los norteamericanos adultos padecen de sobrepeso o son obesos. La obesidad también ha aparecido en algunas zonas de países en desarrollo, donde era desconocida hace menos de una generación. Esta paradoja aparente se debe a que una población que ha crecido con mala nutrición se desplaza de las zonas rurales a las zonas urbanas, donde puede obtener alimentos con mayor facilidad. La obesidad y otras enfermedades del mundo actual prolongan, en cierto sentido, un proceso que empezó hace millones de años. Somos las víctimas de nues-

6. CON DIETAS MUY DIFERENTES pueden satisfacerse los requerimientos nutricionales de la especie humana. Algunas poblaciones subsisten con alimentos vegetales, casi exclusivamente; otras se abastecen, sobre todo, de alimentos de origen animal. Aunque los habitantes de países industrializados ingieren menos carne que algunos pueblos con modos de vida tradicional descritos aquí, padecen niveles de colesterol más altos y la obesidad es más frecuente entre ellos (como indica el índice de masa corporal), porque consumen más energía de la que gastan y se alimentan de carne muy rica en grasas.

Población	Consumo de energía (kilocalorías por día)	Energía de procedencia animal (%)	Energía de procedencia vegetal (%)	Colesterol en sangre (miligramos por decilitro)	Indice de masa corporal (peso/altura al cuadrado)
CAZADORES-RECOLECTORES					
!Kung (Botswana)	2100	33	67	121	19
Inuit (América del Norte)	2350	96	4	141	24
GANADEROS					
Turkana (Kenla)	1411	80	20	186	18
Evenki (Rusia)	2820	41	59	142	22
AGRICULTORES					
Quechua (Altiplanos de Perú)	2002	5	95	150	21
SOCIEDADES INDUSTRIALES					
EE.UU.	2250	23	77	204	26

Nota: El consumo de energía señala el promedio adulto (hombres y mujeres); los datos del colesterol en sangre y el índice de masa corporal (IMC) se refieren a hombres. IMC saludable = 18,5-24,9; sobrepeso = 25,0-29,9; obesidad = 30 o mayor.

tro propio éxito evolutivo: hemos adquirido una dieta muy calórica, mientras minimizábamos la cantidad de energía que gastamos en nuestra actividad diaria.

La magnitud de este desequilibrio se hace patente cuando observamos poblaciones humanas con estilos de vida tradicionales. El estudio de los evenki que he llevado a cabo con Michael Crawford, de la Universidad de Kansas, y Luzmila Osipova, de la Academia de Ciencias Rusa en Novosibirsk, indica que estos pastores de renos obtienen la mitad de su aportación calórica diaria de la carne: más de dos veces y media lo que consume un norteamericano medio. Pero cuando comparamos a los hombres evenki con los estadounidenses, vemos que son un 20 % más delgados y tienen un 30 % menos de colesterol.

Estas diferencias se deben en parte a la composición de su dieta. Aunque los evenki consumen mucha carne, no es demasiado grasa porque los animales que pastan libremente, como los renos, poseen menos grasas corporales que el ganado vacuno y otros animales cebados. (En la dieta de esos pastores, alrededor del 20 % de su energía procede de la grasa, mientras que en la alimentación de un norteamericano representa el 35 %.) La composición de la grasa también difiere en los animales libres: suelen tener menos grasas saturadas y niveles más elevados de ácidos grasos poliinsaturados, que protegen de las enfermedades del corazón. Pero aún cuenta más el gasto energético tan alto que requiere el modo de vida de los evenki.

No sólo la modificación de la dieta ha generado muchos graves problemas de salud; también nos ha afectado la interacción entre tipo de alimentación y cambios del modo de vida. Muy a menudo, se presentan las patologías actuales como resultado del consumo de alimentos “poco sanos” que nos alejan de la dieta humana “natural”. Se trata de un planteamiento erróneo. Nuestra especie no evolucionó para subsistir con un único tipo de dieta. Nos distingue la extraordinaria variedad de lo que comemos. Hemos arraigado en casi todos los ecosistemas del planeta, con alimentaciones de todo tipo, desde las que abarcan casi cualquier alimento animal, adoptadas por las poblaciones árticas, a las que se ciñen a tubérculos y cereales de algunos pueblos andinos. La evolución humana se ha caracterizado por la diversidad de las estrategias que hemos desarrollado para alimentarnos de maneras que cubran nuestras particulares necesidades metabólicas y nos hagan más eficaces al extraer energía y nutrientes del entorno. El reto que afrontan las sociedades modernas es equilibrar las calorías que consumimos con las que gastamos.

DIVERSIDAD DE DIETAS

La variedad de tipos satisfactorios de alimentación que practican los pueblos de vida tradicional proporciona una interesante perspectiva en el actual debate que enfrenta a los regímenes altos en proteínas y bajos en hidratos de carbono contra los regímenes que aumentan los hidratos de carbono y restringen los lípidos. No es sorprendente que ambos produzcan una pérdida de peso; ambos adelgazan por medio del mismo mecanismo básico: restringen las principales fuentes de calorías. Cuando se crea un déficit energético (es decir, cuando se consumen menos calorías de las que se gastan), el cuerpo utiliza la grasa almacenada y pierde peso.

La gran duda sobre las dietas saludables de pérdida o de mantenimiento de peso estriba en si crean pautas alimentarias que puedan mantenerse a largo plazo. Parece que las dietas que limitan severamente grupos amplios de alimentos (por ejemplo, los hidratos de carbono) son mucho más difíciles de mantener que las menos restrictivas. A este respecto, parece que las dietas que limitan amplias categorías de alimento (hidratos de carbono, por ejemplo) resulten más difíciles de mantener que las que son moderadamente restrictivas. Existe también motivo de preocupación por las potenciales consecuencias a largo plazo del consumo de alimentos que proceden de animales de engorde (en general suelen tener más grasa y considerablemente más ácidos grasos saturados que los animales que campan a sus anchas).

Hace muy poco el Instituto de Medicina de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos propuso unas directrices sobre dieta y ejercicio que concuerdan con las ideas de este artículo. El Instituto no sólo estableció una gran amplitud en las cantidades de hidratos de carbono, grasas y proteínas que proporcionan una alimentación saludable (reconociendo a todos los efectos que existen muchas formas de cubrir nuestras necesidades de nutrición), sino que también recomendaba practicar ejercicio moderado durante una hora al día. Siguiendo estas directrices y combinando nuestra dieta con el ejercicio, podremos vivir más a la manera de los evenki de Siberia, de otras sociedades tradicionales y de nuestros antepasados homínidos.

Bibliografía complementaria

RETHINKING THE ENERGETICS OF BIPEDALITY. William R. Leonard y Marcia L. Robertson en *Current Anthropology*, vol. 38, n.º 2, páginas 304- 309; abril 1997.

HUMAN BIOLOGY: AN EVOLUTIONARY AND BIOCULTURAL APPROACH. Dirigido por Sara Stinson, Barry Bogin, Rebecca Huss-Ashmore y Dennis O’Rourke. Wiley-Liss, 2000.

ECOLOGY, HEALTH AND LIFESTYLE CHANGE AMONG THE EVENKI HERDERS OF SIBERIA. William R. Leonard, Victoria A. Galloway, Evgueni Ivakine, Ludmila Osipova y Marina Kazakovtseva en *Human Biology of Pastoral Populations*. Dirigido por William R. Leonard y Michael H. Crawford. Cambridge University Press, 2002.

AN ECOMORPHOLOGICAL MODEL OF THE INITIAL HOMINID DISPERSAL FROM AFRICA. Susan C. Antón, William R. Leonard y Marcia L. Robertson en *Journal of Human Evolution* (*en prensa*).

Ibn Sahl, descubridor de la ley de la refracción de la luz

Un manuscrito revela que Ibn Sahl, matemático árabe, había descubierto la "ley de Descartes" ya en el siglo X

Brahim Guizal y John Dudley



1. **IBN AL-HAYTHAM pasó la mayor parte de su vida en El Cairo, a caballo entre los siglos X y XI. Fue el autor del tratado de óptica que sirvió de inspiración a los científicos occidentales de la Edad Media y del Renacimiento, hasta los trabajos de Harriot, Snell y Descartes. Estableció por vez primera la distinción entre la óptica geométrica y la óptica fisiológica, a la que se consagra el manuscrito en cuestión.**

R. y S. MICHAUD/RAPHO

En Francia, la ley de la refracción de la luz es conocida por el nombre de "ley de Descartes". La publicó, junto con su *Discurso del método*, en 1637. Los países anglosajones la llaman "ley de Snell", en recuerdo del físico alemán que la enunció en 1621. ¿A quién debemos atribuir esa "ley de los senos", sen $i = n$ sen r? Los occidentales han tenido largo tiempo la convicción de que entre el "Milagro de Grecia" y el Renacimiento reinó la oscuridad más completa. Hoy se reconoce que los sabios del mundo árabe no se limitaron a traducir las obras griegas e indostánicas, sino que practicaron también la ciencia experimental y desbrozaron dominios científicos que no se hollaron en Europa hasta mucho más tarde. El descubrimiento, debido a Roshdi Rashed, de un nuevo manuscrito árabe del siglo X donde se lee la ley de la refracción se inscribe en la historia de aquel florecimiento cultural, insuficientemente conocido, que entre Bagdad y Córdoba hizo avanzar las ciencias.

Los espejos ustorios

Descartes, en su tratado, utiliza la ley de la refracción a fin de determinar la forma de las anaclásticas, es decir, de las superficies refractantes capaces de concentrar en un solo punto los rayos incidentes en ellas. Ya en la Antigüedad se utilizaban lentes convexas para encender fuegos. En el siglo III antes de nuestra era, Aristófanes sugería que se calentasen con las lentes las tabletas de cera para borrar las deudas que se habían consignado en ellas. Las vestales, en Roma, utilizaban las lentes convergentes cada vez que volvían a encender su fuego sagrado con una llama "pura" emanada de los rayos del Sol. Ya en el siglo I de nuestra era, Plinio el Viejo refiere que el emperador Nerón tenía gran aprecio por las lentes porque producían fuego y corregían la visión.

Los rayos del Sol se enfocaban también mediante espejos cóncavos: en el siglo III antes de nuestra era, se decía que Arquímedes había hecho arder con ellos las ropas de los soldados romanos que asediaban la colonia griega de Siracusa. Los espejos cóncavos fueron llamados *speculi ustori* (espejos ustorios, "que prenden fuego") en la Edad Media, probablemente porque servían para encender las piras funerarias.

Aunque los romanos debieron de tener conocimiento del punto donde convergían los rayos reflejados, no le dieron nombre. El nombre actual, "foco" (del latín *focus*), se debe al astrónomo Johannes Kepler (1571-1630), que efectuó asimismo investigaciones sobre las propiedades de las superficies reflectantes y refractantes varios decenios antes que Snell y Descartes. Kepler estudió el enfoque de los rayos mediante espejos parabólicos, elípticos e hiperbólicos. Cuando descubrió que los planetas describían órbitas elípticas, es natural que situase al Sol en uno de los focos.

Los focos de Kepler

Kepler no tuvo tanto éxito con las lentes convexas, pues no disponía de la ley de los senos, que le habría llevado hasta las anaclásticas. Para obtener esta ley se puso en contacto con el astrónomo inglés Thomas Harriot, quien había dado a entender que la había descubierto. Según las notas de Harriot, estudiadas por los historiadores de la ciencia en el decenio de 1950, tenía establecida la ley de los senos hacia 1602 (la ley de Snell-Descartes debería, pues, haber sido rebautizada con el nombre de ley de Harriot). Cuando Kepler le solicitó la ley, Harriot le envió tablas de valores experimentales, lamentándose de que su estado de salud le impidiera enunciar la ley explícitamente en forma apta para ser publicada. Es posible que no quisiera arriesgarse a atraer sobre sí las iras de la clerecía, que veía con suspicacia los trabajos científicos. A medida que la salud de Harriot decaía se fue agotando la paciencia de Kepler, quien finalmente se decidió a establecer por sí solo la ley de la refracción. Observó que cuando los rayos son casi paralelos al eje de la lente (los rayos paraxiales), el ángulo de refracción es proporcional al ángulo de incidencia. Observó, además, que el coeficiente de proporcionalidad dependía de los medios que el rayo atravesaba. Procedió de manera semejante con las lentes y, más adelante, con los instrumentos astronómicos. Sin embargo, esta aproximación no le permitió determinar la forma de las anaclásticas, que los científicos llevaban buscando desde hacía tanto tiempo.

Además de su correspondencia con Harriot, Kepler se sirvió de otras fuentes de información. Hacia 1600 había escrito un tratado de óptica astronómica, prolongación de otro de un sabio polaco, Witello, muy anterior, de 1270, que contenía también la *Optica Thesaurus*, un manual árabe de óptica traducido al latín (se ignora por quién). El título original era *Kitâb al-manâzir*; lo escribió en el siglo XI el sabio árabe Abu Ali al-Hasan Ibn al-Haytham, a quien la Europa medieval se referiría con la forma latinizada de su apellido, Alhacén. Así pues, la influencia de Ibn al-Haytham en Europa se remontaba ya a varios siglos atrás: desde la Edad Media al Renacimiento, casi todos los tratados de óptica se fundaron en sus trabajos.

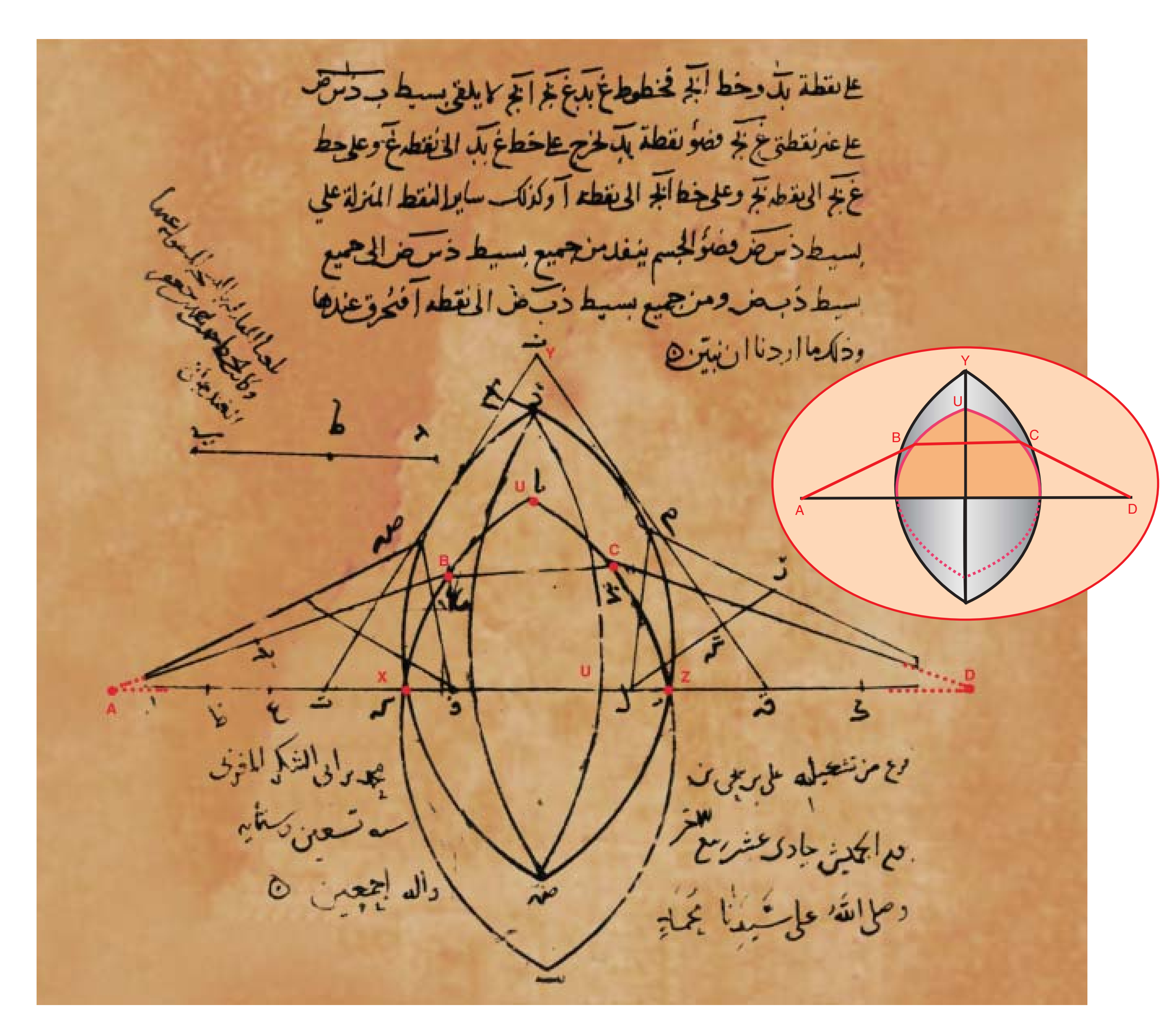
La escuela árabe

En contra de una idea bastante extendida en Occidente, los científicos árabes no fueron meros bibliotecarios que se limitaran a perpetuar el saber griego; por el contrario, ampliaron grandemente en numerosas disciplinas los conocimientos de sus predecesores antiguos. Tras un período de traducciones masivas de los principales autores griegos (Euclides, Herón, Ptolomeo o Teón, en lo tocante a óptica), que comienza bajo la dinastía de los Omeyas, en el siglo VII, los árabes se aplicaron a enmendar los errores contenidos en las obras griegas.

Bajo el reino de los Abásidas, a partir de 750, los califas se enriquecieron gracias al comercio a gran escala; su imperio alcanzó entonces su máxima extensión geográfica y controló las rutas terrestres y marítimas que llevan a Asia. Emergió en esos tiempos una clase de intelectuales en las grandes ciudades del mundo árabe que abrieron bibliotecas, como Damasco, Bagdad (la nueva capital) e incluso El Cairo. Los califas abásidas practicaron una política de mecenazgo científico sistemático que propició grandes avances. En óptica, la obra más monumental es la de Ibn al-Haytham; pero, por importante que sea, no surgió de la nada: este sabio fue heredero de una larga tradición de pensamiento creador. En el mundo árabe tiene, señaladamente, tres notables predecesores, lectores críticos del legado griego, que revisaron y confirmaron por medio de experimentos.

Los autores

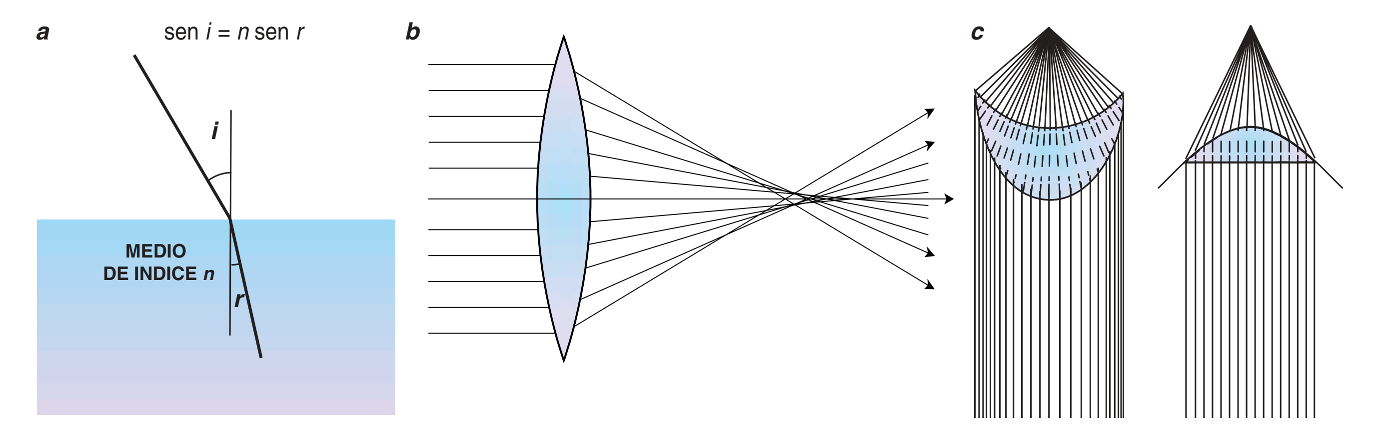
BRAHIM GUIZAL y JOHN DUDLEY son físicos del Laboratorio de Optica P. M. Duffieux, de la Universidad del Franco Condado.



2. EXTRACTO DE *Sobre los instrumentos ardientes*, de Ibn Sahl, escrito hacia 984. Tras haber enunciado la ley de los senos y estudiado la refracción a través de una superficie hiperbólica, abordó las lentes biconvexas limitadas por dos hipérbolas. La figura describe la trayectoria de los rayos luminosos al atravesar la lente. El texto que la acompaña demuestra que un rayo que emane del punto A (e incida en B en la semilente XYZ) experimentará una primera refracción que lo transformará en un rayo paralelo al eje de la lente; tras una segunda refracción en C atravesará el eje de la lente por el punto D. La dificultad de lectura de la representación se debe a que los rayos ABCD no se encuentran en el plano de la figura, sino por delante, como se indica en el dibujo anexo. Ibn Sahl termina afirmando que lo mismo ocurre para todos los rayos incidentes sobre la lente y que esta última encierra al punto D.

CORTESIA DE ROSHDI RASHED

El primero de ellos, Al-Kindi, era iraquí. Pasó la mayor parte de su vida en Bagdad, donde muere en 866. Filósofo y erudito, escribió nueve tratados de óptica. En uno de sus experimentos comprobó (ayudándose de una plancha perforada con un orificio a través del cual pasaban los rayos) la igualdad de los ángulos de incidencia y de reflexión con respecto a la normal a un espejo. Ibn Luka, el segundo, también fue iraquí. Entre 860 y 895 tradujo en Bagdad textos científicos griegos. Más tarde fue llamado a Armenia, junto al califa; allí publicó diversas obras sobre la reflexión de la luz. Un siglo después, en la época de Ibn Sahl, tercer predecesor de Ibn al-Haytham, la configuración política de la comunidad musulmana había cambiado: el declive de la dinastía de los abásidas había dado lugar a la aparición de señores locales. A pesar de esta fragmentación, la política de mecenazgo de los príncipes permaneció invariable, lo que aseguró a Ibn Sahl las condiciones materiales necesarias para proseguir sus trabajos. Pasó del estudio de los espejos al de las lentes.



3. EN EL SIGLO X, Ibn Sahl formuló la ley de la refracción (la desviación que experimenta un rayo luminoso al pasar de un medio transparente a otro) en la forma en que hoy la conocemos (*a*). Provisto de esta ley, determinó la forma de las anaclásticas, es decir, de las superficies de lente que concentran todos los rayos luminosos en un único punto. En Europa, donde este saber se había perdido, Kepler señala que el círculo no es una de ellas (*b*), pero no consigue descubrirlas. Por fin, Descartes las publica junto con su *Discurso del método*, en 1637 (*c*).

El error de Ptolomeo se perpetúa

Viene seguidamente Ibn al-Haytham. Nacido en Irak, en 965, abandona su país para instalarse en El Cairo, donde transcurre lo esencial de su vida, hasta su muerte en 1040. Es poco lo que sabemos de él, pero su obra científica, que alcanza también a las matemáticas y a la astronomía, es inmensa. En ella sobresale la óptica: escribe diversos tratados especializados (sobre el arco iris, sobre las sombras, sobre los espejos esféricos...), que él mismo sintetiza en el *Kitâb al-manâzir*.

Ibn al-Haytham distingue la óptica física geométrica de la óptica fisiológica. Para los autores griegos, el mecanismo de la visión estaba vinculado a un rayo que salía del ojo e iluminaba el objeto observado. Ibn al-Haytham demuestra que la luz posee existencia propia: no pertenece ni al objeto ni al individuo que lo ve. En óptica geométrica, consagra a la refracción el séptimo capítulo del *Kitâb al-manâzir*. Adopta, al igual que sus predecesores, un procedimiento científico riguroso, fundado en la experimentación, y se vale de dos leyes cualitativas: (1) el rayo incidente, el rayo refractado y la normal al dioptrio (la superficie de separación de los dos medios) son coplanarios; (2) la trayectoria del rayo que atraviesa un dioptrio en un sentido es la misma que la del rayo que lo atraviesa en sentido contrario. En otro tratado, titulado *La esfera ardiente*, estudia las lentes esféricas valiéndose de las tablas numéricas de la *Optica* de Ptolomeo (del siglo II). La obra del alejandrino aborda la refracción en las interfases aire/vidrio y aire/agua, pero los resultados que ofrece no pasan de aproximados.

Ahora bien, se ha hallado recientemente un manuscrito de Ibn Sahl, en parte en la biblioteca Milli de Teherán y en parte en la de Damasco, que contiene la forma exacta de la ley de la refracción. El autor de este descubrimiento, Roshdi Rashed, especialista en historia de las ciencias árabes de la Universidad París VII, había descubierto ya numerosos manuscritos importantes en museos de diferentes países del mundo árabe. El tratado de Ibn Sahl, titulado *Sobre los instrumentos ardientes*, fue escrito entre 983 y 985. Ibn Sahl estudia en él los espejos ustorios y después las lentes convergentes. Necesita para las lentes la ley de la refracción, y comienza refiriéndose a la *Optica* de Ptolomeo, pero rechaza los valores numéricos que propone este autor. Se da cuenta de que la noción de medio es de importancia capital y caracteriza a cada uno de los dos que intervienen con una razón constante (el inverso del índice de refracción del medio, dividido por el índice del aire). Da, seguidamente, la moderna ley de la refracción. Calcula, por último, las superficies anaclásticas que Descartes creyó que había descubierto. En consecuencia, debería ser Ibn Sahl quien recibiese el reconocimiento de haber sido el primero en establecer la ley de la refracción.

Además del manuscrito original de Ibn Sahl, Roshdi Rashed ha editado y analizado también el séptimo libro de la *Optica* de Ibn al-Haytham. ¿Por qué no adoptó este autor la forma correcta de la ley de la refracción de Ibn Sahl, en lugar de seguir utilizando las tablas de Ptolomeo, relegando así al olvido una ley que los ópticos tardarían más de seis siglos en volver a descubrir? Según Rashed, Ibn al-Haytham, que introdujo en la óptica y, con mayor generalidad, en la física la noción misma de demostración experimental, quería que los valores numéricos procediesen de la experiencia.

Bibliografía complementaria

A PIONEER IN ANACLASTICS: IBN SAHL, ON BURNING MIRRORS AND LENSES. Roshdi Rashed, en *Isis*, vol. 81, págs. 464-491; 1990.

GÉOMETRIE ET DIOPTIQUE AU X^E SIÈCLE. Roshdi Rashed. Les Belles Lettres; París, 1993.

Genética e historia de las poblaciones del norte de Africa y la península Ibérica

El análisis genético ha revelado que los amplios intercambios culturales producidos entre el Magreb y la península Ibérica no conllevaron grandes intercambios de poblaciones

E. Bosch, F. Calafell, S. Plaza, A. Pérez-Lezaun, D. Comas, J. Bertranpetit

Las poblaciones humanas se componen de individuos genéticamente distintos entre sí. Del estudio de la variabilidad de nuestra especie se ocupa la genética de poblaciones aplicada a escala mundial. A dicha disciplina le corresponde exponer la magnitud y distribución de la variabilidad genética humana.

Dos personas cualesquiera, tomadas al azar, se distinguen, en promedio, en un 0,1 % de las bases nucleotídicas que conforman su ADN. Expresado de otro modo, discrepan en seis millones de pares de bases. (El ADN humano consta de unos 3000 millones de pares de bases en cada una de las dos dotaciones haploides, una procedente del padre y otra de la madre.)

Si del individuo pasamos a las poblaciones, las diferencias observadas explican, a lo sumo, un 15 % de la disparidad genética total; un 10 % se debe a las diferencias entre grandes grupos continentales y el 5 % restante a las diferencias entre poblaciones de un mismo continente. Aun siendo pequeñas, estas últimas diferencias tienen que ver con la historia de cada población. Podemos apoyarnos en la diversidad genética entre poblaciones para reconstruir la historia demográfica.

El acervo genético de las poblaciones actuales es el resultado de la interacción entre diversas fuerzas evolutivas. Dependen éstas, a su vez, de la historia demográfica de las poblaciones, de las características intrínsecas de las regiones genómicas estudiadas y de la interacción entre genoma y factores ambientales.

Las características intrínsecas de cada región del genoma remiten a sus tasas y patrones de mutación y recombinación, así como a su modo de herencia. Se trata de parámetros que la ciencia conoce con razonable precisión.

La interacción entre la variabilidad de cada gen y el ambiente (tomado en sentido amplio, incluida, pues, la interacción con otros genes) puede promover la selección natural. Es decir, unas variantes pueden mostrarse más eficientes y verse privilegiadas por la selección, en tanto que otras pueden ser desfavorables. Lo observamos en la hemoglobina. Algunas variantes de esta proteína confieren resistencia a la malaria; la selección prima su presencia en zonas palúdicas. En consonancia con ello, el estudio de la variabilidad de la hemoglobina nos informará sobre la distribución de la malaria con mayor rigor que la historia de las poblaciones.

Conviene saber que sólo un 1,5 % de la secuencia de ADN humano llega a expresarse, es decir, determina proteínas que se sintetizan y son objeto de selección natural. Por lo tanto, la mejor estrategia para conocer la historia de las poblaciones será la que se centre en la variabilidad presente en el 98,5 % restante, cuyas probabilidades de verse afectada por la selección son mucho menores.

A partir de esta premisa podemos analizar dicha variación, explicar las diferencias genéticas neutras (polimorfismos) que encontramos entre los individuos de una población e interpretarlas en términos de historia de las poblaciones.

Disponemos de un amplio bagaje teórico, desarrollado desde los años cuarenta, gracias al cual, dada una historia demográfica, podemos predecir sus efectos sobre la diversidad genética. Podemos reconstruir

Los autores

E. BOSCH, F. CALAFELL, S. PLAZA, A. PEREZ-LEZAUN, D. COMAS y J. BERTRANPETIT han desarrollado la investigación que recoge su artículo en la Unidad de Biología Evolutiva de la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona, cuya actividad se centra en el estudio de la diversidad genética en poblaciones humanas y en primates.



1. EMBARQUE DE LOS MORISCOS en el puerto de Vinaroz.

J. GARCIA ROSELL, ARCHIVO DIGITAL DE IMAGENES DE LA BIBLIOTECA LAMBERT. OBRA PERTENECIENTE A LA COLECCION ARTISTICA DE LA CAJA DE AHORROS DE VALENCIA, CASTELLON Y ALICANTE, BANCAJA

la historia demográfica a partir de la diversidad genética investigada en diversas regiones del genoma, que difieren en su velocidad de cambio y que permiten reconocer huellas genéticas a distintas profundidades de un tiempo pasado.

Deriva genética

¿Cómo influye la historia en la diversidad de las poblaciones? A través de dos mecanismos básicos: la deriva genética y el flujo génico. En la deriva se engloban todos los fenómenos de cambio genético aleatorio que se dan cuando una generación transmite sus genes a la siguiente. Así como hay apellidos que prosperan y otros que se pierden en razón del número de hijos varones procreados en cada generación, las variantes genéticas (o *alelos*) pueden también cambiar de frecuencia; en ambos casos se trata de fenómenos aleatorios. Tales oscilaciones serán tanto más intensas cuanto menor sea la población, por un simple efecto de muestreo. Las desviaciones respecto a la probabilidad teórica son mayores si realizamos un número pequeño de ensayos, de la misma forma que al tirar una moneda al aire repetidas veces sólo se alcanza con seguridad la frecuencia esperada de 1/2 si se lanza muchísimas veces.

Se presenta un caso extremo de grandes cambios genéticos aleatorios, conocido por *efecto fundador*, cuando un grupo reducido de individuos establece una nueva población y se lleva consigo una muestra no necesariamente representativa de los genes de la población de origen. En la colonización sucesiva de las islas de la Polinesia, por ejemplo, se dio una secuencia clara de efectos fundadores; en el curso de la misma, un grupo limitado de individuos partía de una isla y se asentaba en la siguiente.

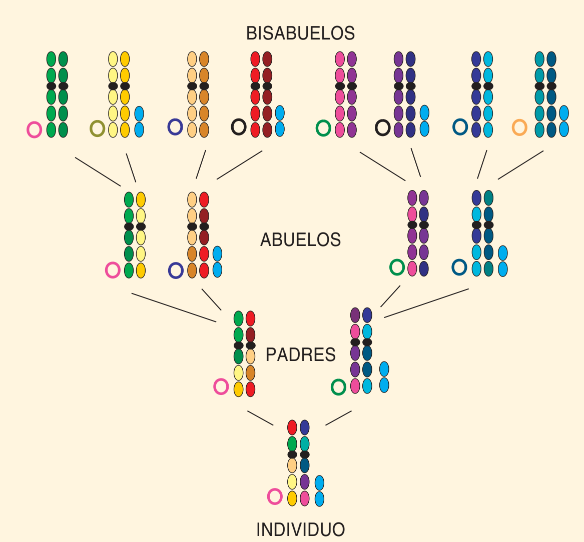
Las oscilaciones aleatorias de las frecuencias alélicas pueden llegar a la extinción de algunas de estas variantes. Puesto que dichas oscilaciones son más intensas en poblaciones pequeñas, se pierde variabilidad más fácilmente en éstas. A no ser que se dé una tasa de mutación extraordinaria, resulta muy poco probable que en las poblaciones pequeñas se regenere la variación perdida. Por lo tanto, al detectar una menor variabilidad genética en una población actual, podemos reconocer episodios de reducción de la población en el pasado (los llamados cuellos de botella), aunque la población actual se haya recuperado.

Además, habida cuenta de la naturaleza aleatoria de la deriva genética, las poblaciones pequeñas contiguas tenderán a diferir más entre sí que las mayores. Esta misma naturaleza aleatoria puede manifestarse de manera ligeramente diversa en regiones genómicas distintas. En consecuencia, los análisis basados en una sola región genómica pueden resultar poco fiables. Conviene siempre considerar la información procedente de un número razonable de regiones genómicas y extraer las tendencias medias.

Flujo génico

Dos poblaciones que se hayan diferenciado, por deriva, en su composición genética y entren en contacto, pueden mezclarse y dar

Patrones de herencia: autosomas, cromosoma Y, ADN mitocondrial



E. BOSCH, F. CALAFELL, S. PLAZA, A. PEREZ-LEZAUN, D. COMAS Y J. BERTRANPETIT. (Adaptada de Jobling and Tyler-Smith en *Trends in Genetics*, n.º 11, págs. 449-456; 1995.)

Nuestro ADN se dispone en 23 pares de cromosomas. Cada miembro de un par es casi idéntico al otro en longitud y en la información que contiene; se trata de dos rasgos distintivos de cada par. Cada miembro de cada par de cromosomas nos viene de un progenitor; a cada uno de nuestros hijos le legaremos un solo miembro de cada pareja. Pero no es una transmisión fidedigna; en virtud del proceso de recombinación del material genético no heredamos el cromosoma original, sino una mezcla que contiene partes de cada miembro del par, tomadas al azar. Para ilustrarlo, la figura muestra un par de cromosomas que contiene fragmentos de distinta longitud de los cromosomas de los bisabuelos. Por eso resulta imposible predecir *a priori* de qué antepasado proviene un determinado fragmento de ADN autosómico.

Hay en el genoma dos regiones que presentan un patrón de herencia distinto. Nos referimos a los cromosomas sexuales y el ADN mitocondrial. A diferencia de los autosomas, los cromosomas sexuales (X e Y) son muy diferentes entre sí. El cromosoma Y determina la masculinidad a través de la acción de un único gen, SRY (*sex-determining region*); los cigotos con un cromosoma X y un cromosoma Y generan embriones masculinos, en tanto que los portadores de dos cromosomas X generan embriones femeninos. Por lo tanto, los varones heredan el cromosoma Y de su padre, que a su vez lo recibió del abuelo paterno, de la misma forma que se hereda el primer apellido. Lo vemos reflejado en la figura: de los cuatro bisabuelos varones, sólo el abuelo paterno del padre lega su cromosoma Y (*azul liso*) a su bisnieto.

Además de los cromosomas, que residen en el núcleo de las células, otros orgánulos contienen ADN. Se trata de las mitocondrias, que alojan decenas de copias de una pequeña molécula circular de ADN. Este ADN mitocondrial (ADNmt) se hereda por vía materna: el ADNmt del embrión procede sólo del óvulo, porque el ADNmt del espermatozoide no llega a penetrar en el óvulo. Así, en la genealogía del ejemplo, el ADN mitocondrial del individuo (*magenta*) proviene de su madre, de su abuela materna, de la madre de ésta, y así sucesivamente.

Para entender esta figura sobre cromosomas y herencia, adviértase que las barras grandes representan autosomas (cromosomas no ligados al sexo), las pequeñas representan el cromosoma Y (cuya presencia denota un varón) y los círculos, el ADN mitocondrial. De abajo arriba se esquematiza un individuo, su madre y su padre, sus cuatro abuelos y sus ocho bisabuelos.

lugar a una población con características genéticas de las dos de partida. Este fenómeno de *flujo génico*, así se le llama, se debe a la migración. La propia migración en distancias cortas, habitual a través del matrimonio, puede promover, a largo plazo, el intercambio de genes a grandes distancias. Lo observamos, por ejemplo, en las poblaciones de Asia Central, que poseen características genéticas intermedias entre las de Europa y las de Asia Oriental; su peculiar constitución genética podría explicarse por su posición central y milenios de migraciones individuales de corto alcance.

La diferenciación entre poblaciones resultante de la deriva genética se acentúa con el paso del tiempo. Para medirla disponemos de un parámetro, la *distancia genética*, que indica el grado de diferenciación entre pares de poblaciones para múltiples regiones del genoma. Si se trata de un conjunto de poblaciones, podemos representar su matriz de distancias genéticas mediante algoritmos; ofrecen éstos un paisaje genético que refleja las afinidades y diferencias dentro del conjunto poblacional. El paisaje compendia la historia de las poblaciones en términos de deriva genética y flujo génico.

Para trazar y cuantificar con razonable precisión los flujos génicos, disponemos de una nueva herramienta de análisis. Se trata de la filogeografía. Estudia ésta la genealogía del gen que ha dado origen a la variación existente dentro de una región del genoma y la distribución geográfica de dicha variabilidad.

Ante una diversidad genética dada, pensemos en una secuencia de ADN o en un conjunto de polimorfismos, la herramienta mencionada se propone reconstruir el proceso evolutivo o filogenético que ha desembocado en la diferenciación observada a partir de un antepasado común. Al plasmar conjuntamente la diversificación del gen y la de las poblaciones, podemos anclar ciertas variantes genéticas (secuencias o haplotipos) en una rama del árbol evolutivo y en un origen geográfico. Aplicando ese método se ha cuantificado la aportación por vía paterna y materna de africanos, europeos y amerindios al acervo genético de la población brasileña contemporánea.

Para datar puntos concretos de la evolución humana se puede recurrir a los microsatélites, segmentos de ADN que contienen repeticiones de breves secuencias de dos a seis nucleótidos. Son marcadores de evo-

lución rápida. A partir de un determinado acontecimiento fundador, la cantidad de variación acumulada y medible es una función de la tasa de mutación (que podemos estimar) y del tiempo transcurrido, que es la incógnita que despejaremos. Por ejemplo, se observó que la mayoría de los judíos apellidados Cohen ("sacerdote") poseían cierto tipo de cromosoma Y. Concurre, además, que la condición de sacerdote, el apellido y el cromosoma Y se transmiten de padres a hijos exclusivamente por la línea masculina. Pues bien, de la variación acumulada en los microsatélites de este tipo de cromosoma Y se infiere un efecto fundador que operó hace unos 3000 años, coincidente con el establecimiento de una casta sacerdotal hebrea.

El Magreb y la península Ibérica

El análisis de la diversidad genética humana en poblaciones actuales ha arrojado luz sobre numerosas cuestiones históricas, en distintas escalas temporales y espaciales. Sabemos ya que la distribución y la antigüedad de la diversidad genética a escala mundial son compatibles con un origen reciente y africano de la humanidad actual. El punto de arranque, situado en Africa, se remontaría, a lo sumo, unos 150.000 años atrás. Por tanto, ni los habitantes del yacimiento de Atapuerca ni los neandertales serían antepasados nuestros.

A escala continental, se debate la proporción de genes de origen paleolítico (hace unos 30.000 años) y neolítico (hace 10.000) presentes en los europeos actuales. Los genes, por otro lado, apuntan a una fecha antigua (unos 30.000 años) y a un origen claramente norteasiático para la colonización de América.

A escala regional, podemos abordar también algunas cuestiones abiertas sobre la historia de las poblaciones. Se cuenta aquí con la colaboración de otras disciplinas; la arqueología, la paleoantropología o la lingüística suministran a menudo hipótesis que, en la medida que impliquen distintas historias demográficas, pueden verificarse mediante el estudio de la diversidad genética de las poblaciones actuales.

Desde la genética de poblaciones podemos abordar cuestiones que atañen a la península Ibérica (España y Portugal) y al noroeste de Africa (el Magreb: Marruecos, el Sahara Occidental, Mauritania, Argelia y Túnez). ¿Se puede hablar de un origen común para ambas poblaciones a sendas orillas del Mediterráneo? ¿Quedan en las poblaciones actuales rastros de un substrato paleolítico que represente el poblamiento inicial de los antepasados de las poblaciones actuales? ¿Es el mismo substrato para ambas regiones? ¿Cuál fue la aportación de la oleada de avance neolítica? ¿Qué fracción del acervo genético magrebí proviene de la invasión árabe? ¿Podemos identificar la contribución magrebí a las poblaciones peninsulares? ¿Es el Sahara una barrera impenetrable al intercambio de genes entre poblaciones?

Para resolver esa gavilla de cuestiones sobre el poblamiento y las relaciones genéticas entre la península Ibérica y el Magreb, hemos recurrido al análisis de marcadores clásicos, microsatélites autosómicos, inserciones Alu, secuencias de ADN mitocondrial, polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) del cromosoma Y y microsatélites del cromosoma Y en muestras de poblaciones ibéricas, beréberes del norte, centro y sur de Marruecos y del centro de Argelia, árabes marroquíes, argelinos y tunecinos, y saharauis. No se estudiaron todas las poblaciones para todos los marcadores, aunque sí se investigó extensamente un núcleo fundamental.

En el caso de los marcadores clásicos, recopilamos la información publicada por otros equipos de trabajo. En otros casos, contrastamos nuestros resultados con los obtenidos por otros autores. De la investigación realizada se desprende una descripción, que creemos ajustada, de la historia de las poblaciones norteafricanas e ibéricas.

Orígenes remotos de norteafricanos y habitantes de la península Ibérica

Con pocas excepciones, todos los marcadores genéticos analizados muestran una separación clara entre las poblaciones magrebíes y la de España y Portugal, incluidas, sin embargo, en el rango de la variación de las poblaciones *caucasoides* (las de origen europeo, más las norteafricanas y medioorientales). Ahora bien, las distancias genéticas entre ibéricos y el resto de europeos son menores que entre ibéricos y magrebíes.

Este patrón mayoritario no se refleja en todos y cada uno de los genes analizados. Por ejemplo, en la región que lleva la información para la síntesis de los antígenos de los leucocitos humanos (HLA), los cuales definen la compatibilidad en trasplantes de órganos. Basándose en una sola región del genoma (y sometida a selección), algunos autores postularon un origen común de peninsulares y magrebíes. Pero la naturaleza aleatoria de la deriva genética y la acción de la selección pueden producir este tipo de desviaciones; para evitarlas, la interpretación debe apoyarse en la información conjunta del máximo número posible de genes y no en una sola región del genoma.

De acuerdo con nuestro análisis de marcadores clásicos, las distancias genéticas entre ibéricos y poblaciones del Oriente Medio son menores que la que existe entre ibéricos y magrebíes. Se da, además, una discontinuidad abrupta entre las orillas septentrional y meridional en el paisaje genético de la cuenca mediterránea, con una máxima pendiente en el estrecho de Gibraltar.

Estas y otras consideraciones nos llevaron a postular que en el Magreb pudo conservarse un substrato paleolítico, distinto del substrato paleolítico europeo. Supondría ello que, a diferencia de lo que parece haber sucedido en Europa, la transición al Neolítico norteafricano se produjo sin un recambio sustancial de genes. En esa hipótesis abunda la cultura capsiense del Mesolítico norteafricano, que se prolonga hacia el Neolítico adoptando las nuevas formas de producción, aunque sin la drástica ruptura que se observa en gran parte de Europa. Planteamiento que viene avalado por investigaciones con secuencias Alu y microsatélites.

Hallamos una confirmación directa de la hipótesis anterior al analizar la filogeografía del cromosoma Y.

Los linajes del cromosoma Y, definidos a partir de SNPs, presentan una genealogía muy clara y una distribución geográfica que tiende a ser restringida. Las frecuencias del mismo en una región difieren de las observadas en la otra: en la península Ibérica predominan, lo mismo que en el resto de Europa Occidental, el linaje R1b* y sus inmediatos derivados (el conjunto R1b3, R1b6 y R1b8), en tanto que dos tercios de los cromosomas Y magrebíes pertenecen al linaje E3b2*.

Tras la investigación realizada sobre la variación en el cromosoma Y ha quedado patente que el grupo de linajes R1b se encuentra sólo en Oriente Medio y Europa. Ciertos linajes (R1b3, R1b6 y R1b8) se hallan circunscritos a la península Ibérica; habrían surgido aquí a partir del haplotipo fundador, sin apenas dispersarse allende sus fronteras. El grupo de linajes R1b, por su antigüedad y distribución geográfica, se habría originado en Oriente Medio y se habría difundido por Europa con las colonizaciones iniciales del Paleolítico superior.

El linaje magrebí E3b2* se ha hallado en otras poblaciones, aunque con frecuencias mucho menores. Su antepasado más inmediato aparece entre los etíopes. Si atendemos a la acumulación de variabilidad en microsatélites asociada a E3b2*, se trataría de un linaje de más de 19.000 años de existencia. Podemos, pues, postular un escenario en que una expansión paleolítica desde Africa nororiental llevara al Magreb los antepasados del linaje E3b2*, que surgiría *in situ* después de la expansión. El linaje masculino E3b2* tiene un correlato en el linaje matrilineal mitocondrial U6, también de antepasados etíopes y difusión limitada al noroeste de Africa, aunque no alcanza las elevadas frecuencias de E3b2*. Por consiguiente, dos regiones genómicas independientes con filogeografías bien establecidas confirman la singularidad magrebí y sitúan sus raíces en el Paleolítico.

El Neolítico: un avance paralelo

Se admite que la agricultura y ganadería comenzaron en Oriente Medio hace unos 10.500 años. Esa fase prehistórica conllevó el crecimiento y la expansión consiguiente de la población en varias direcciones. Pero se debate si dicha expansión supuso un recambio genético en las poblaciones europeas o si se conserva en la actualidad un importante substrato genético paleolítico (anterior a la expansión del Neolítico), así como el grado en que ocurrió una cosa u otra.

Si atendemos al paisaje genético europeo, advertiremos un gradiente o clina desde el sudeste hacia el noroeste. Asimismo, aparece otra clina este-oeste en el norte de Africa, desde Egipto hasta Marruecos. No es fácil dar con una explicación de dichas clinas, pues se produjeron varios movimientos migratorios en esas mismas direcciones; por ejemplo, la primera colonización del Paleolítico y el avance del Neolítico en Europa, o el Neolítico y las in-

Tipos de polimorfismos genéticos

La variabilidad genética se presenta en múltiples formas. Con las técnicas disponibles nos es dado conocer distintas facetas de dicha variación. Podemos analizar directamente la variabilidad del ADN. Asimismo, los *marcadores genéticos clásicos* son los sistemas polimórficos detectados en los productos de expresión génica. A través de esta segunda vía, históricamente anterior a la primera, se nos revelaron los primeros sistemas polimórficos genéticos, por ejemplo, el de los grupos sanguíneos, descubiertos en 1900. Otros marcadores clásicos consisten en la variación de movilidad de proteínas plasmáticas, enzimas eritrocitarias y el sistema de antígenos leucocitarios humanos (antígenos HLA), que determinan la compatibilidad de los trasplantes.

La variabilidad o polimorfismo del ADN puede tomar varias formas. En la más sencilla, una determinada posición de nuestro genoma puede presentar dos variantes químicas (raras veces más de dos) de las cuatro posibles en las que se escribe el alfabeto del ADN (G, A, T y C). Se trata de un *SNP* (*Single Nucleotide Polymorphism*), de los que se calcula que hay unos tres millones en el genoma humano; se caracteriza por que en una posición concreta del genoma puede haber una u otra base (A o G, por ejemplo).

En vez de limitarnos a una sola posición del genoma, podemos definir un cierto segmento y determinar su secuencia en un conjunto de individuos. Esta estrategia permite, además de reconocer las variantes existentes en ciertas posiciones, descubrir también toda la variación que hay en el ADN y reconstruir su genealogía, es decir, el proceso evolutivo que dio lugar a la variabilidad observada.

Encontramos otro tipo de variación genética en los *microsatélites* o *STR* (*Short Tandem Repeat Polymorphisms*). Estas secuencias de ADN consisten en la repetición en tándem de una unidad básica de entre 2 y 6 nucleótidos de longitud. Presentan una particularidad distintiva: el número de repeticiones de la unidad básica es muy variable entre individuos. Por ese motivo se han convertido en importantes marcadores en el campo de la genética forense (identificación de personas y de la paternidad).

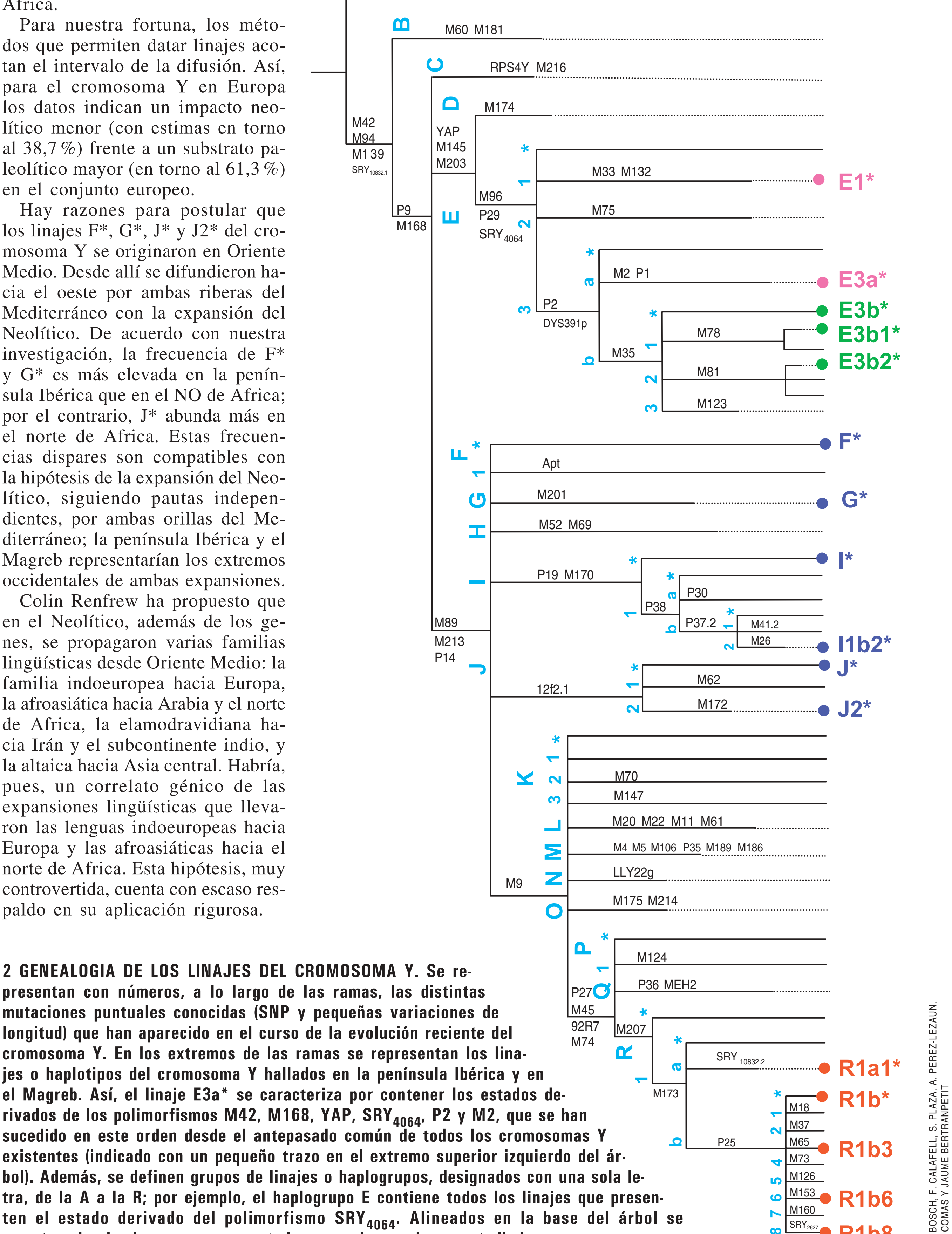
Las *inserciones Alu* constituyen, por último, otro tipo interesante de polimorfismo. Estas secuencias, de unos 300 nucleótidos de longitud, utilizan la maquinaria celular de replicación del ADN para copiarse a sí mismas y reinsertarse en otras partes del genoma. Las nuevas inserciones, lo mismo que cualquier otro polimorfismo, pueden perderse o fijarse, pero algunas de ellas se hallan en una situación intermedia. Aunque esta tercera situación se da con cierta frecuencia, es un fenómeno variable de una población a otra. Además, caso único entre los polimorfismos, conocemos bien cuál es la dirección de la evolución: normalmente, de la ausencia (estado ancestral) a la presencia (estado derivado) del elemento Alu.

vasiones árabes en el norte de Africa.

Para nuestra fortuna, los métodos que permiten datar linajes acotan el intervalo de la difusión. Así, para el cromosoma Y en Europa los datos indican un impacto neolítico menor (con estimas en torno al 38,7 %) frente a un substrato paleolítico mayor (en torno al 61,3 %) en el conjunto europeo.

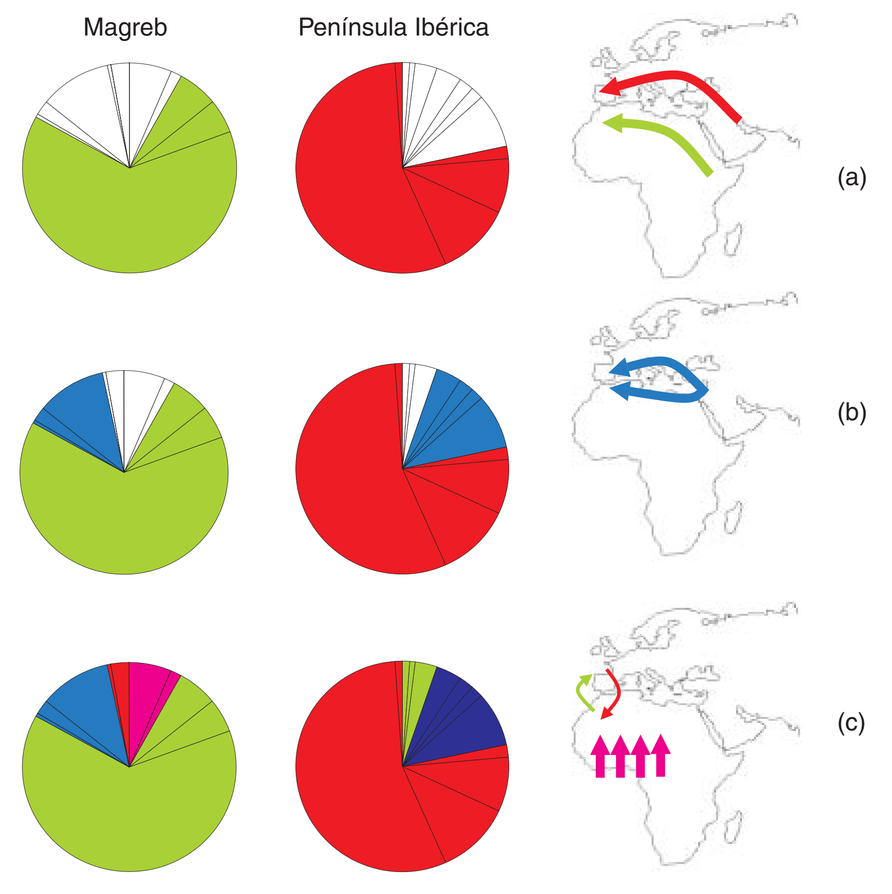
Hay razones para postular que los linajes F*, G*, J* y J2* del cromosoma Y se originaron en Oriente Medio. Desde allí se difundieron hacia el oeste por ambas riberas del Mediterráneo con la expansión del Neolítico. De acuerdo con nuestra investigación, la frecuencia de F* y G* es más elevada en la península Ibérica que en el NO de Africa; por el contrario, J* abunda más en el norte de Africa. Estas frecuencias dispares son compatibles con la hipótesis de la expansión del Neolítico, siguiendo pautas independientes, por ambas orillas del Mediterráneo; la península Ibérica y el Magreb representarían los extremos occidentales de ambas expansiones.

Colin Renfrew ha propuesto que en el Neolítico, además de los genes, se propagaron varias familias lingüísticas desde Oriente Medio: la familia indoeuropea hacia Europa, la afroasiática hacia Arabia y el norte de Africa, la elamodravidiana hacia Irán y el subcontinente indio, y la altaica hacia Asia central. Habría, pues, un correlato génico de las expansiones lingüísticas que llevaron las lenguas indoeuropeas hacia Europa y las afroasiáticas hacia el norte de Africa. Esta hipótesis, muy controvertida, cuenta con escaso respaldo en su aplicación rigurosa.



2 GENEALOGIA DE LOS LINAJES DEL CROMOSOMA Y. Se representan con números, a lo largo de las ramas, las distintas mutaciones puntuales conocidas (SNP y pequeñas variaciones de longitud) que han aparecido en el curso de la evolución reciente del cromosoma Y. En los extremos de las ramas se representan los linajes o haplotipos del cromosoma Y hallados en la península Ibérica y en el Magreb. Así, el linaje E3a* se caracteriza por contener los estados derivados de los polimorfismos M42, M168, YAP, SRY_{4064}, P2 y M2, que se han sucedido en este orden desde el antepasado común de todos los cromosomas Y existentes (indicado con un pequeño trazo en el extremo superior izquierdo del árbol). Además, se definen grupos de linajes o haplogrupos, designados con una sola letra, de la A a la R; por ejemplo, el haplogrupo E contiene todos los linajes que presenten el estado derivado del polimorfismo SRY_{4064}. Alineados en la base del árbol se muestran los haplogrupos representados en ambas regiones estudiadas.

E. BOSCH, F. CALAFELL, S. PLAZA, A. PEREZ-LEZAUN, D. COMAS Y JAUME BERTRANPETIT



E. BOSCH, F. CALAFELL, S. PLAZA, A. PEREZ-LEZAUN, D. COMAS Y JAUME BERTRANPETIT

3. HISTORIA DE LA POBLACION y linajes del cromosoma Y en el Magreb y la península Ibérica. (*a*) La primera colonización del Paleolítico se da independientemente en ambas regiones; introduce en el Magreb (*verde*) los linajes E3b*, E3b1* y E3b2*; en la península Ibérica (*rojo*), los linajes R1a1*, R1b* (que ulteriormente dio lugar a R1b8), R1b3 y R1b6. En los diagramas de sectores se muestra la frecuencia de dichos linajes en cada población. (*b*) La expansión del Neolítico, desde el Creciente Fértil y en paralelo por ambas riberas del Mediterráneo, aporta los linajes F*, J*, J2*, I* e I1b2* (*azul*). (*c*) Los fenómenos migratorios implican flujo génico desde la península hacia el Magreb (*en rojo*), en sentido contrario (*verde*), y desde más allá del Sahara hacia el Magreb (*malva*).

Arabes y beréberes

Los beréberes (o *imazighen*) constituyen los descendientes directos de una población ancestral que se extendía por gran parte del norte de Africa, desde Egipto hasta Senegal. Suman hoy 20 millones de personas, dispersas en pequeñas minorías de Egipto, Libia y Senegal. Sin embargo, muchos habitantes de Túnez, Argelia y Marruecos se definen a sí mismos como tales y hablan alguna de la veintena de lenguas beréberes, una rama de la familia afroasiática. El resto de la población habla y se considera árabe, y se supone descendiente de las invasiones, que desde el siglo VII y con especial intensidad en el XI, llevaron el Islam desde la península Arábiga hasta el Magreb.

Así las cosas, podemos plantearnos si las invasiones árabes implicaron una aportación demográfica significativa o si, por el contrario, una elite numéricamente limitada pero culturalmente prestigiosa consiguió difundir una nueva lengua y religión, sin que ello conllevara una aportación de genes notable. Para resolver tal disyuntiva hemos de acudir al análisis genético de las poblaciones árabes y beréberes.

El análisis de gran cantidad de marcadores (inserciones Alu, microsatélites autosómicos y polimorfismos del cromosoma Y) nos revela una llamativa ausencia de diferencias entre poblaciones árabes y beréberes. Sólo el ADN mitocondrial separa de los beréberes a los árabes argelinos y tunecinos (pero no marroquíes). Debemos concluir, pues, que la arabización del Magreb fue un fenómeno básicamente cultural, en que una reducida elite impuso su lengua y religión, sin que hubiera cambios sustanciales en la población local, incluso la actualmente arabófona.

Más allá del Sahara

La comparación de la diversidad genética con la hallada al sur del Sahara permite rastrear el flujo génico transahariano. En el estudio de las inserciones Alu se advierte con nitidez que las poblaciones más al sur de nuestra zona de trabajo (saharauis y beréberes del sur de Marruecos) muestran distancias genéticas más cortas con las poblaciones subsaharianas que las que se dan entre subsaharianos y poblaciones del norte del Magreb. Tal comprobación nos induce a pensar en un gradiente de flujo génico subsahariano; en el curso del mismo, las poblaciones del sur del Magreb habrían recibido una mayor aportación de genes subsaharianos, lo que, dada su posición geográfica y el conocido comercio de esclavos, parece verosímil.

Las regiones genómicas con una filogeografía bien establecida permiten cuantificar la aportación subsahariana. Así, en el norte de Africa aparecen en bajas frecuencias (un 8 % en conjunto) los linajes E1* y E3a* del cromosoma Y, de origen subsahariano; no se han hallado en la península Ibérica.

En el caso del ADN mitocondrial, son de origen subsahariano los linajes L1, L2 y L3, que constituyen una media del 25 % de los linajes magrebíes (con un rango entre 3 % en rifeños y 40 % en mauritanos). En la península Ibérica, presentan una frecuencia media del 3 %, oscilando entre su ausencia en vascos y un 6 % en portugueses del centro. En el caso de la Península, es difícil decidir si estos linajes proceden directamente de allende el Sahara, traídos con la trata de esclavos, o si, dada su frecuencia en el Magreb, llegaron a Iberia vía con-

tactos a través del estrecho de Gibraltar.

De la comparación entre los datos del ADN mitocondrial y los del cromosoma Y se desprende que los linajes subsaharianos heredados por vía materna se hallan a una frecuencia más elevada en magrebíes e ibéricos que los linajes paternos, lo que indicaría una diferencia entre sexos en la movilidad de los individuos desde el sur del desierto del Sahara. Esa observación genética debe contrastarse con datos sociales de movilidad y comercio de esclavos.

Tráfico en el estrecho de Gibraltar

¿Qué decir, por último, de las relaciones entre las poblaciones magrebíes y las peninsulares? Dejamos constancia al principio de la nítida separación entre ambas poblaciones, debido, probablemente, a un substrato paleolítico distinto. Ese hito temporal permite la detección del flujo génico a través del estrecho, así como su cuantificación a partir de linajes del cromosoma Y y del ADN mitocondrial.

Las personas y, si se reproducen, sus genes han cruzado el estrecho de Gibraltar con distinta intensidad a lo largo de la historia. En algunos períodos, dicho flujo aumentó. Además, se trata de una corriente bidireccional, pues también se dio un flujo génico de la Península al Magreb. De norte a sur, cruzaron el estrecho romanos, vándalos, judíos y moriscos. Los dos últimos grupos podrían haber difundido genes ibéricos. Del sur llegaron a Hispania los cartagineses; en el 711 arribaron los árabo-beréberes. En el siglo XII vinieron oleadas de almohades, almorávides y benimerines. Los datos genéticos no permiten precisar cuándo se produjo el tráfico. Sólo podemos descubrir el conjunto acumulado de los intercambios genéticos.

Como hemos comentado, el linaje E3b2* del cromosoma Y se originó en el Magreb, donde constituye unos dos tercios del total. En España y Portugal, su frecuencia se estima alrededor del 6 %, con mínimos en el País Vasco y Cataluña y máximos en Extremadura y Andalucía occidental. Dado que el flujo génico del Magreb hacia la Península acarrearía otros linajes, subestimaríamos la contribución genética magrebí de la Península si sólo consideráramos E3b2*; corrigiendo a tenor de la frecuencia de E3b2* respecto al total de linajes del cromosoma Y, la contribución norteafricana al acervo genético ibérico se puede estimar en un 8 %. Al estudiar la variación de microsatélites dentro de este linaje, se observa una estrecha similaridad entre los haplotipos ibéricos y los magrebíes. La variación observada en haplotipos peninsulares pudo haberse acumulado en un intervalo temporal que la hace compatible con las entradas del siglo VIII y, sobre todo, con las del siglo XII.

Por lo que respecta al ADN mitocondrial, encontramos un equivalente de E3b2* en U6, de origen magrebí, aunque menos frecuente. Se halla en un 10 % de los magrebíes y en un 1,5 % de los habitantes de nuestra península. La ausencia de linajes maternos específicamente norteafricanos a frecuencias moderadas o elevadas dificulta la estimación de la contribución femenina magrebí a la península; aunque existe, obviamente.

En un sentido inverso, los cromosomas Y del grupo R1b que hay en el Magreb pueden ser de origen europeo, si bien no podemos precisar que fuera específicamente ibérico. Su frecuencia, del 2,8 % en norteafricanos, alcanza el 78,4 % en ibéricos; ello supone una contribución europea del 3,6 % al acervo genético magrebí. Por lo que respecta al ADN mitocondrial, el linaje V, de origen europeo, se encuentra en una frecuencia del 6,8 % en norteafricanos.

Conclusiones

La historia nos recuerda las intensas relaciones culturales y sociales que han existido, a lo largo de los siglos, entre el Magreb y la península Ibérica (España y Portugal). Elites o pueblo llano, mercaderes o guerreros, portaban una lengua, una religión, una cultura, en definitiva. Pero hasta ahora se nos mostraba esquivo el impacto demográfico ejercido por esos flujos, que los datos genéticos nos muestran existente pero moderado. Y todavía se debaten los movimientos relacionados con la expansión islámica.

Los datos genéticos, con sus limitaciones, han permitido trazar un primer marco comparativo entre ambas orillas del Mediterráneo, con la reconstrucción consiguiente de la historia e intercambios mutuos de sus poblaciones. La genética aporta el marco de la historia demográfica, en cuyo interior hemos de identificar las pruebas de intercambios suministradas por otras disciplinas.

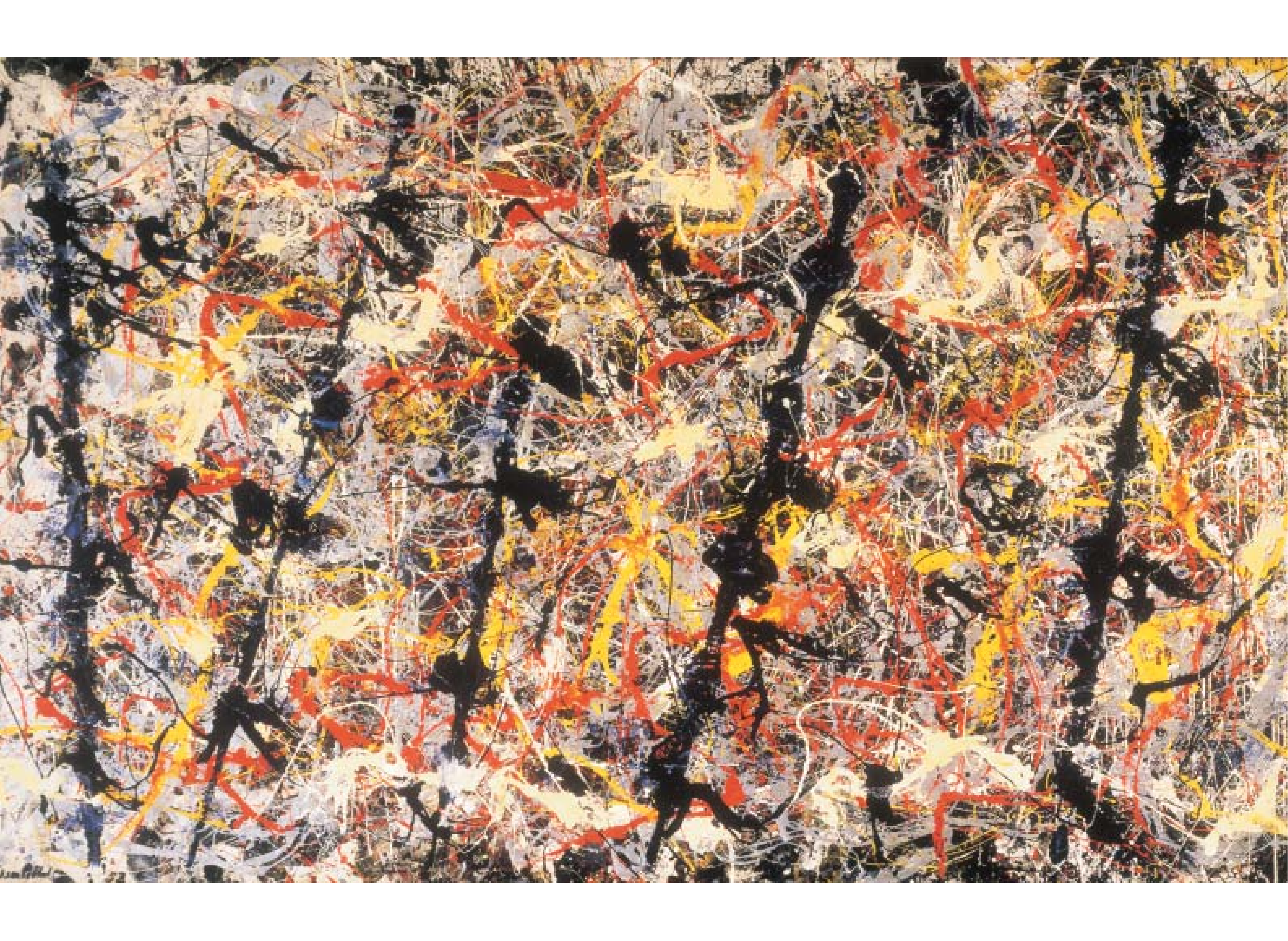
Los cambios y sustituciones en el credo religioso, en la lengua o en los perfiles de las excavaciones arqueológicas nos hablan de interrelaciones y desplazamiento culturales. El alcance demográfico de los procesos demográficos asociados a esas transformaciones culturales hallan un correlato genético, cuya magnitud se va desentrañando merced al avance en el conocimiento del genoma. Es una de las múltiples sorpresas que la biología actual nos depara.

Bibliografía complementaria

GENETIC STRUCTURE OF NORTHWESTERN AFRICA REVEALED BY STR ANALYSIS. E. Bosch, F. Calafell, A. Pérez-Lezaun, J. Clarimon, D. Comas, E. Mateu, R. Martínez, B. Morera, Z. Brakez, O. Akhayat, A. Sefrani, G. Hariti, A. Cambon-Thomsen y J. Bertranpetit en *European Journal of Human Genetics*, n.º 8, págs. 360-366; 2000.

ALU INSERTION POLYMORPHISMS IN NW AFRICA AND THE IBERIAN PENINSULA: EVIDENCE FOR A STRONG GENETIC BOUNDARY THROUGH THE GIBRALTAR STRAITS. D. Comas, F. Calafell, N. Benchemsi, A. Helal, G. Lefranch, M. Stoneking, M. A. Batzer, J. Bertranpetit y A. Sajantila en *Human Genetics*, n.º 107, páginas 312-319; 2000.

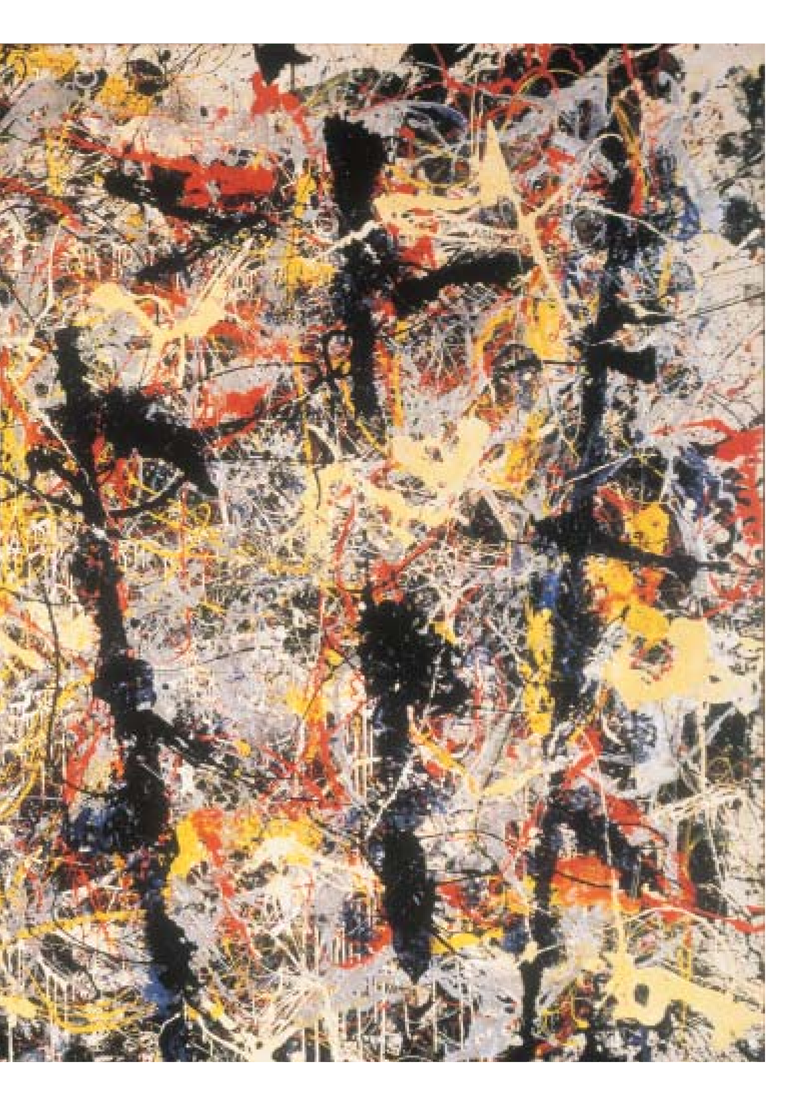
HIGH RESOLUTION ANALYSIS OF HUMAN Y-CHROMOSOME VARIATION SHOWS A SHARP DISCONTINUITY AND LIMITED GENE FLOW BETWEEN NORTHWESTERN AFRICA AND THE IBERIAN PENINSULA. E. Bosch, F. Calafell, D. Comas, P. J. Oefner, P. A. Underhill y J. Bertranpetit en *American Journal of Human Genetics*, n.º 68, págs. 1019-1029; 2001.



El análisis computarizado está ayudando a explicar el atractivo de las pinturas de Jackson Pollock. Los famosos goteos y marañas de este artista crean motivos fractales, similares a los que árboles, nubes y costas forman en la naturaleza

Richard B. Taylor

Orden en el caos de Pollock



1. *BLUE POLES: NUMBER 11, 1952* es un buen ejemplo de la maraña de pintura tan característica de Pollock. La entretejía gracias a una serie de descargas de pigmentos, superpuestas a lo largo de la creación de la obra, que en el caso de *Blue Poles* se extendió seis meses (esmalte y pintura metalizada sobre lienzo, 210 cm por 486,8 cm).

Ebrio y al borde del suicidio, Jackson Pollock (1912-1956) puso en una tempestuosa noche de marzo los cimientos de su obra maestra *Blue Poles: Number 11, 1952*. Extendió en el suelo de su granero sacudido por el viento un gran lienzo; valiéndose de un palo fue dejando que escurriese sobre la tela pintura de uso doméstico, que tomaba de un bote viejo.

No era ésta la primera vez que el artista creaba una obra haciendo que gotease pintura sobre el lienzo. Había elaborado la técnica de verter un hilo constante de pintura sobre el lienzo horizontal (*dripping*); en vez de los trazos discontinuos que impregna en la tela el contacto ordinario de los pinceles, obtenía así unas singulares trayectorias continuas. Esta forma de pintar, engañosamente simple, polarizó las opiniones en el mundo de la pintura. ¿Animaba este primitivo estilo pictórico la genialidad en bruto, o se trataba, sencillamente, de un borracho que se mofaba de las tradiciones artísticas?

Me ha apasionado siempre la obra de Pollock porque, además de mi trabajo como físico, he pintado cuadros abstractos. En 1994 dejé en punto muerto mi carrera científica y me dediqué por entero a la pintura. Abandoné el departamento de física de la Universidad de Nueva Gales del Sur, en Australia, y partí a la inglesa Escuela de Arte de Manchester, centro con la reputación de que enseña a pintar según el método de "o nadas, o te hundes". En un desolador mes de febrero, la escuela nos desterró a todos los alumnos hasta los páramos de Yorkshire, en el norte de Inglaterra; se nos dijo que teníamos una semana para pintar lo que viéramos. Un fuerte vendaval de nieve hizo imposible la tarea. De una conversación con los amigos surgió la idea de que fuera la naturaleza la que pintase por nosotros.

Ensamblamos con tal propósito una enorme estructura valiéndonos de ramas que el vendaval había desgajado de los árboles. Una parte de la estructura actuaba a modo de vela gigantesca que atrapaba los movimientos del viento que se arremolinaba a su alrededor. Este movimiento se transfería a otra parte de la estructura; sostenía unos recipientes de pintura, que iban dejando caer hilos de pintura sobre una tela extendida en el suelo, donde trazaban una figura que seguía la trayectoria de los vientos. Cuando otro gran temporal fue echándosenos encima, nos retiramos a cubierto y dejamos que la estructura siguiera pintando durante la noche. Al día siguiente la tormenta había pasado y... ¡la imagen que dejó nos recordaba a un pollock!

De repente, me sobrevino la impresión de que encajaban todas las piezas secretas del arte de Pollock: debía de atenerse al pintar a los ritmos de la naturaleza. Me percaté en este punto de que tendría que volver nuevamente a la ciencia para averiguar si sería posible identificar en sus obras indicios tangibles de tales ritmos.

El arte, precursor de la ciencia

Suponíase en tiempos de Pollock que en la naturaleza dominaba el desorden, que su comportamiento era en esencia aleatorio. Desde aquellas fechas, sin embargo, han aflorado dos fascinantes campos de estudio que buscan una comprensión más completa de las reglas naturales.

En el decenio de 1960 se empezó a examinar de qué formas evolucionan con el tiempo los sistemas naturales, por ejemplo el tiempo meteorológico. Se descubrió que no se someten al mero azar, sino que subyace en ellos, agazapada, una forma de orden de notable sutileza. A este tipo de comportamiento se lo denominó "caótico," y con el fin de explicar el comportamiento dinámico de la naturaleza surgió un nuevo campo científico, la teoría del caos. Algo más tarde, en el decenio siguiente, hizo aparición una nueva forma de geometría, que se proponía describir las configuracio-

nes que estos procesos caóticos dejaban tras de sí. Su descubridor, Benoit Mandelbrot, les dio el nombre de "fractales"; en nada se parecían a las figuras euclídeas tradicionales. En contraste con la tersura de las líneas artificiales, los fractales constituyen configuraciones que, por muy fino que sea el grado de detalle con que se las examine, se repiten recurrentemente y engendran formas de inmensa complejidad. Las pinturas creadas por nuestro artilugio de las ramas me hicieron pensar que tal vez las marañas, en apariencia aleatorias, de las pinturas de Pollock podrían también poseer un cierto orden interno, que podrían ser fractales.

Una propiedad básica para caracterizar un fractal es la dimensión fractal *D*, que cuantifica el efecto del cambio de escala a medida que se somete la figura a diferentes ampliaciones. En el caso de las figuras euclídeas se trata de una noción sencilla, que se expresa mediante los números enteros de siempre. En el caso de una línea tersa (desprovista de estructura fractal), *D* tiene el valor 1; en el caso de una superficie lisa y completamente llena, vale 2. Sin embargo, en una configuración fractal la repetición de la estructura hace que la línea ocupe área. En tal caso, *D* se encuentra en el intervalo entre 1 y 2: según aumenta la complejidad y riqueza de la estructura recurrente se va aproximando a 2.

Para determinar en qué medida podría lo anterior ser aplicable a las pinturas de Pollock, regresé a mi laboratorio de Nueva Gales del Sur; allí recurrí a la informática para cuantificar las configuraciones de sus lienzos. Hubiera sido imposible llevar a cabo este tipo de análisis sin la precisión y potencia de cómputo que proporcionan los ordenadores. Enrolé a dos compañeros que poseían especial pericia informática: a Adam Micolich, que investigaba técnicas de análisis fractal para su doctorado en dispositivos semiconductores, y a David Jonas, experto en técnicas de procesado de imágenes.

Comenzamos nuestra investigación introduciendo en el ordenador una imagen digitalizada de un cuadro de Pollock (*véase el recuadro* "Un análisis de la técnica de Pollock"). La recubrimos con una retícula de cuadrados idénticos, también generada por el ordenador. Analizando cuáles eran los cuadrados ocupados por la configuración pintada y cuáles los vacíos, logramos calcular las cualidades estadísticas de la configuración. Reduciendo el tamaño de la malla era como si estudiásemos una ampliación mayor. Nuestro análisis examinó motivos cuyo tamaño iba del de la más minúscula gota de pintura hasta alrededor de un metro. Para nuestra sorpresa, nos encontramos con que las configuraciones eran fractales. Y eran fractales en todos los tamaños examinados, a pesar de que el motivo mayor multiplicaba unas 1000 veces el del más pequeño. Veinticinco años antes de que fueran descubiertos en la naturaleza, Pollock estaba pintando fractales.

Breve historia de los fractales

- La geometría fractal se desarrolló a partir de los estudios sobre la complejidad efectuados por Benoit Mandelbrot en los decenios de 1960 y 1970. Mandelbrot acuñó el término "fractal" a partir del latín *fractus* ("roto"), con la intención de resaltar la naturaleza fragmentada e irregular de estas formas.
- Los fractales presentan autosemejanza: ofrecen el mismo aspecto tras ser sometidos a una ampliación cualquiera. Cada pequeña porción se parece mucho a la estructura total.
- La autosemejanza puede ser de dos tipos: exacta y estadística. El árbol artificial (*serie de la izquierda*) deja ver, a diferentes ampliaciones, la repetición exacta de motivos. En un árbol real (*a la derecha*), los motivos no se repiten exactamente; lo que se repiten, en cambio, son las propiedades estadísticas de dichos motivos. La mayor parte de las configuraciones de la naturaleza obedecen a la autosemejanza estadística, y lo mismo acontece con las pinturas de Pollock.
- Los fractales se caracterizan por su "dimensión", un número que expresa su complejidad. La dimensión fractal no es un número entero, a diferencia de la dimensión de las figuras geométricas elementales, sino un número fraccionario; por ejemplo, una línea fractal tiene una dimensión intermedia entre 1 y 2.



ARBOL ARTIFICIAL: Autosemejanza exacta

ARBOL NATURAL: Autosemejanza estadística

CORTESIA DE RICHARD P. TAYLOR

El atractivo estético de los fractales

Me pregunté, llevando un paso más allá este hallazgo, si la naturaleza fractal de las pinturas de Pollock no formaría parte de su atractivo. Sólo en el decenio pasado se ha empezado a investigar si existen preferencias visuales por las configuraciones fractales. Valiéndose de fractales generados por ordenador con diversos valores de *D*, Clifford A. Pickover, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, observó que se preferían las configuraciones fractales con un valor de 1,8. Posteriormente, Deborah J. Aks y Julien C. Sprott, de la Universidad de Wisconsin-Madison, obtuvieron con fractales generados por un procedimiento informático diferente una preferencia por valores mucho menores, del orden de 1,3. Aunque la discrepancia podría in-

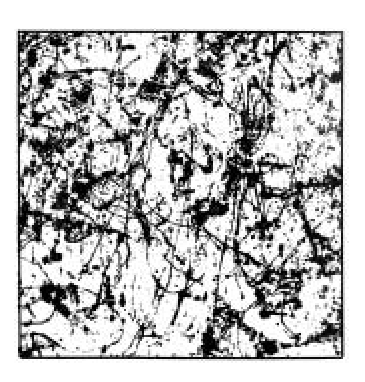
UN ANALISIS DE LA TECNICA DE POLLOCK

EL ANÁLISIS DE LAS OBRAS de Pollock con auxilio de medios informáticos revela que iba depositando capas de pintura según una técnica meticulosa, con la que creaba una densa red de fractales. Se fotografió en ciertas ocasiones a Pollock mientras pintaba (*véase la figura 2*); gracias a ello, mis compañeros Adam Micolich y David Jonas y yo comprendimos mejor su técnica.

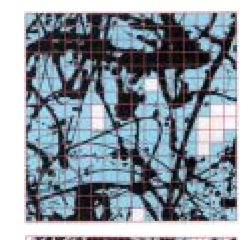


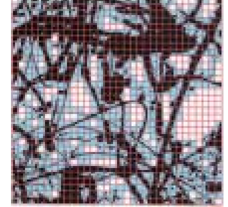
Autumm Rhythm, 1950. Oleo sobre lienzo, 266,7 por 525,8 cm

1 Empezamos por cargar en un ordenador la imagen digitalizada de una de sus obras. Pudimos entonces separar las distintas configuraciones de color y analizar el contenido fractal de cada una. Examinamos también las configuraciones que se obtenían al ir añadiendo, una por una, las distintas capas hasta formar la imagen total. Se expone a la derecha un detalle de la capa negra de *Autumn Rhythm.*

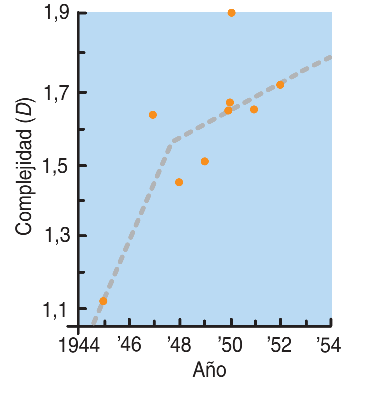


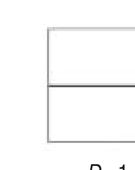
2 Recubrimos la pintura con una retícula generada por ordenador de cuadrados iguales. Hicimos después que el ordenador evaluase las propiedades estadísticas del patrón de líneas analizando qué cuadrículas ocupaba (*en azul*) y cuáles quedaban vacías (*en blanco*). La reducción del tamaño de la cuadrícula (*abajo*) equivale a estudiar las propiedades estadísticas con una mayor ampliación. Encontramos que los motivos eran fractales a todas las escalas.

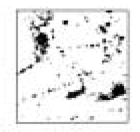


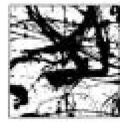


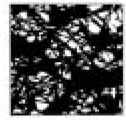
3 Un estudio diacrónico de las obras hizo ver que la complejidad *D* de los motivos fractales iba aumentando conforme refinaba Pollock su técnica. Uno de los valores de *D* es claramente excepcional (1,9); corresponde a una pintura de 1950 que el propio Pollock destruiría más tarde (el análisis se ha basado en una fotografía). Es posible que pensara que esa imagen era demasiado densa, o demasiado compleja, y decidiese dar marcha atrás.

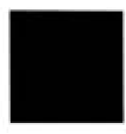












D = 1 no fractal | *D* = 1,1 | *D* = 1,6 | *D* = 1,9 | *D* = 2 no fractal

La evolución en el valor *D* tuvo una profunda influencia en el aspecto de las pinturas. En los fractales correspondientes a un valor *D* pequeño, los motivos que se repiten crean una imagen bastante lisa y dispersa. En cambio, si el valor de *D* se aproxima a 2, se obtiene una configuración repleta de estructura fina e intrincada.

TANTO EL ANÁLISIS COMPUTARIZADO como el examen de las fotografías descubren un proceso pictórico muy deliberado y sistemático. Pollock comenzaba pintando "islas," pequeñas y localizadas, de trayectorias a lo largo y ancho del lienzo. Tiene su miga: algunas de las configuraciones de la naturaleza arrancan de pequeñas nucleaciones que luego se extienden y funden entre sí. Pintaba después trayectorias más largas, extensas, que conectaban las islas e iban gradualmente sumergiéndolas en una densa telaraña fractal de pintura. Esta fase de la obra definía una capa de anclaje que servía de guía para las acciones posteriores del pintor. Durante el proceso de conexionado, la complejidad de la pintura (su valor *D*) aumentaba en plazos de menos de un minuto. Pollock, tras esta febril actividad, solía tomarse un descanso. Más adelante volvía al lienzo, y a lo largo de un período que oscilaba entre dos días y seis meses depositaba nuevas capas de trayectorias de diversos colores sobre la capa de color negro que le servía de anclaje. Efectuaba así una sintonía fina de la complejidad definida por la capa de anclaje. Incluso cuando ya había terminado de pintar, adoptaba medidas que maximizaban el carácter fractal, como el recorte de las regiones periféricas donde la fractalidad era de inferior calidad.

dicar que no hay valores de *D* preferidos a los demás —y que la calidad estética de los fractales está en función, en cambio, del procedimiento utilizado para engendrarlos—, yo conjeturaba que sí existía un valor universalmente preferido.

Deseoso de saber si estaba en lo cierto, recabé de nuevo la asistencia de expertos, en esta ocasión de psicólogos que estudiaban la percepción visual. En colaboración con Branka Spehar, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, Colin Clifford, ahora en la Universidad de Sidney, y Ben Newell, del Colegio Universitario de Londres, investigué tres categorías de fractales: naturales (como los árboles, las montañas o las nubes), matemáticos (simulaciones mediante ordenador) y humanos (porciones recortadas de los cuadros de Pollock). En las pruebas de percepción visual, los participantes manifestaron sistemáticamente su preferencia por valores de *D* en el intervalo de 1,3 a 1,5, con independencia del origen de la configuración. Hace menos, formando equipo con James A. Wise, de la Universidad del Estado de Washington, demostramos que esta apreciación ejerce un efecto sobre el estado fisiológico del observador. Efectuamos pruebas de conductividad de la piel para medir el grado de estrés; hallamos que los sujetos se sienten más a gusto con los valores intermedios de *D*. Estas indagaciones están apenas comenzando; aun así, resulta interesante que muchas de las configuraciones fractales que nos

NO TODAS LAS PINTURAS POR GOTEO SE CREAN DE LA MISMA FORMA

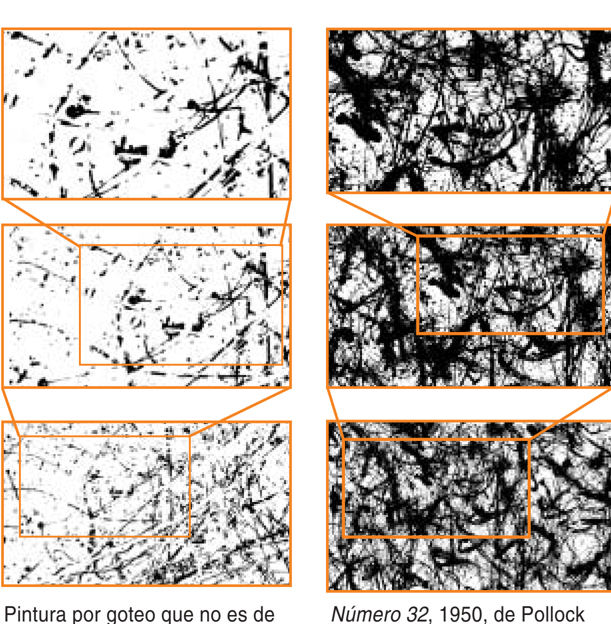
¿SON LOS FRACTALES una consecuencia inevitable de la pintura por goteo? No. Fijémonos en el cuadro por goteo de la derecha, que no es un Pollock. Con Ted P. Martin, de la Universidad de Oregón, apliqué nuestra técnica de análisis computarizado (*véase el recuadro* “Un análisis de la técnica de Pollock”) a la imagen; examinamos su complejidad con detalle cada vez mayor. Descubrimos que los motivos no tenían la misma descripción estadística cuando se los analizaba a distintas ampliaciones; no eran fractales. Cuando se ampliaba la pintura veíamos que las líneas depositadas por goteo perdían estructura rápidamente (*serie izquierda, al pie*). En consecuencia, los motivos tenían con una gran ampliación un aspecto muy diferente del que presentaban bajo ampliaciones pequeñas. Una pintura de Pollock (*serie de la derecha*), en cambio, exhibe las mismas propiedades generales a distintas ampliaciones, con independencia de la localización y del tamaño de las porciones seleccionadas. En ambas pinturas se utilizó la misma secuencia de ampliaciones.

Dado que las propiedades estadísticas de los fractales se repiten a diferentes ampliaciones, *D* no varía al pasar de unos a otros. Se mantiene constante para la pintura de Pollock (*línea roja en el gráfico al pie*), mientras que en la otra (*línea amarilla*) depende del tamaño del motivo, confirmando que la pintura no es fractal. Aunque mis colegas y yo examinamos motivos de hasta un metro, nos centramos en los de tamaños de 1 a 10 mm porque hemos observado que ésa es la región donde mejor se discriminan las obras de Pollock de las que no lo son.

Hemos analizado también cinco cuadros por goteo enviados por coleccionistas; esperaban tal vez que fueran creación de Pollock. Pese a mostrar superficiales semejanzas con las obras de éste, ninguna contenía configuraciones fractales. Los fractales son fruto de una técnica ideada por Pollock: la totalidad de sus 20 pinturas por goteo que examinamos tienen esa composición fractal. Podríamos concluir, por tanto, que las cinco obras que se nos remitieron no fueron pintadas por Pollock. La fractalidad ofrece una prometedora vía para certificar la autoría de los Pollock. Además, dado que el valor de *D* en las obras de este artista fue aumentando con los años siguiendo una tendencia bastante predecible, el análisis de los fractales puede servir también para datar una pintura de Pollock auténtica.

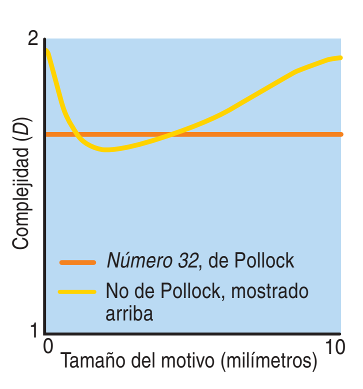


Cuadro por goteo que no es de Pollock, pintura acrílica sobre lienzo, 244 por 122 cm



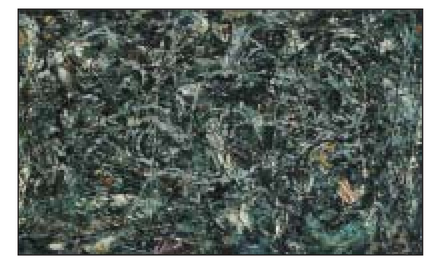
Pintura por goteo que no es de Pollock

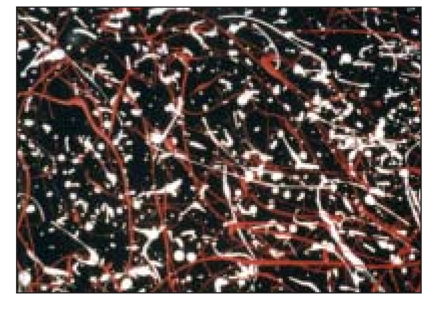
Número 32, 1950, de Pollock











2. POLLOCK, con Lee Krasner, fotografiado en 1950 mientras trabajaba en *One*. Es célebre un comentario suyo: "Los ritmos de la naturaleza son lo que me importa." A la derecha, en sentido descendente, configuraciones naturales creadas por algas, la obra de Pollock *Full Fathom Five*, de 1947, y el "Pollock por causalidad" del autor, pintado por un vendaval.

rodean en la naturaleza posean valores de *D* situados en este mismo intervalo; a las nubes, por ejemplo, les corresponde un valor de 1,3.

¿Qué valor tiene *D* en la obra de Pollock? Es de destacar que fuera creciendo a lo largo de los diez años en que realizó pinturas por goteo, desde 1,12 en 1945 hasta 1,7 en 1952, llegando incluso a 1,9 en una obra que él mismo destruyó. Resulta curioso que refinara durante diez años esa técnica a fin de producir fractales con valores elevados de *D* pese a que se prefieran valores entre bajos y medios. Sin embargo, la mayor complejidad inherente a los valores elevados de *D* puede solicitar la atención del observador más activamente que los "relajantes" fractales de los valores centrales; quizá por ello le resultasen intuitivamente más atractivos al artista. Me dedico ahora en la Universidad de Oregón a examinar esa posibilidad; recurro a un instrumental adecuado para estudiar cómo se contemplan los fractales y los cuadros de Pollock.

La potencia con que el ordenador detecta las características fundamentales de las configuraciones pintadas ofrece una herramienta nueva y prometedora tanto a los teóricos como a los historiadores del arte. Se sumará a los análisis por rayos (infrarrojos, ultravioletas y rayos X), que los expertos en arte ya utilizan de forma habitual; engrosará la creciente colección de métodos científicos para investigar, por ejemplo, las imágenes ocultas tras sucesivas capas de pintura. Es posible incluso que arroje un fino haz de luz sobre los oscuros rincones de la mente donde ejercen su poder las grandes obras.

El autor

RICHARD P. TAYLOR empezó a interrogarse sobre las pinturas de Jackson Pollock mientras dirigía el departamento de física de la materia condensada de la Universidad de Nueva Gales del Sur, en Australia. En la actualidad es profesor en la Universidad de Oregón, donde continúa analizando la obra de Pollock e investigando el caos y la fractalidad en una variedad de sistemas físicos.

Bibliografía complementaria

COMET: JACKSON POLLOCK'S LIFE AND WORK. Kirk Varnedoe en *Jackson Pollock*, por Kirk Varnedoe, con Pepe Karmel. Museum of Modern Art, 1998.

SPLASHDOWN. R. P. Taylor en *New Scientist*. vol. 159, n.º 2144, pág. 30; 25 de julio de 1998.

FRACTAL ANALYSIS OF POLLOCK'S DRIP PAINTINGS. R. P. Taylor, A. P. Micolich y D. Jonas, en *Nature*, vol. 399, pág. 422, 3 de junio de 1999.

ARCHITECT REACHES FOR THE CLOUDS. R. P. Taylor en *Nature*, vol. 410, pág. 18, 1 de marzo de 2001.

Microesferas, átomos fotónicos y la física de la nada

La luz puede quedar atrapada dentro de diminutas esferas transparentes. Las sorprendentes propiedades que adquiere entonces quizá conviertan la fotónica de microesferas en una nueva rama de la técnica

Stephen Arnold

La transferencia de energía entre moléculas próximas desempeña una función fundamental en la naturaleza. Si las plantas pueden alimentar su metabolismo y crecimiento con la luz del sol gracias a la fotosíntesis, es gracias a un curioso fenómeno físico que lleva energía de una molécula de clorofila a otra aunque estén separadas medio nanómetro. Unos centenares de moléculas de clorofila pasan de esa manera la energía que toman del Sol a un único centro de reacción, punto de partida de reacciones químicas posteriores. Sin este mecanismo de transferencia, la fotosíntesis se detendría.

Hará unos 15 años empecé a preguntarme si no actuarían formas similares de transferencia de energía en los procesos fotoquímicos que tienen lugar en las partículas de los aerosoles. En particular, quería saber si no encerraría detalles sutiles la transferencia de energía entre las moléculas de una gota aislada de unas 10 micras de diámetro. Debió de parecerles una idea descabellada a la mayoría de los físicos. El mayor alcance de un intercambio de este tipo, descubierto por el premio Nobel Jean Perrin y descrito en términos mecanocuánticos hace docenas de años, es de sólo 5 nanómetros. Los contenedores que yo me proponía usar eran 2000 veces mayores. Por lo tanto, no había razones claras para esperar que la pequeñez ejerciera la menor influencia. Con todo, en las investigaciones de algunos grupos había visos de fenómenos físicos interesantes. Apremié a Lorcan Folan, uno de mis estudiantes de doctorado, para que los investigara. No me podía imaginar que los resultados que tanto nosotros como otros grupos íbamos pronto a conseguir dirigirían la atención de la técnica de vanguardia hacia las diminutas partículas de los aerosoles.

Emulación de las partículas

Parecerá que la tarea de sondear algo tan delicado como la transferencia de energía entre moléculas debería amedrentar; el procedimiento no resulta tan complicado, sin embargo. Primero se excita una molécula de un determinado tipo, el donante, iluminándola con la luz de un láser, sintonizado como corresponda, que llevará los electrones desde el estado fundamental a un nivel de energía más alto. Para comprobar si se ha producido la transferencia de esta energía a una molécula de otro tipo, el aceptor, se estudia el color característico de la luz que se emite cuando los electrones excitados caen a un estado de energía más bajo (se trata de un proceso bien conocido, la fluorescencia). Si no se transfiere energía entre donantes y aceptores, sólo las moléculas donantes darán lugar a la fluorescencia, que manifestará el color que les sea propio. Por tanto, el cociente entre la fluorescencia del aceptor y la del donante ofrece una buena manera de medir la cantidad de energía transferida.

Para llevar a cabo una medición así en una gota microscópica, se mezclan donantes y aceptores apropiados y se observa el espectro de fluorescencia inducido por el láser. Se tropieza con una complicación de cierto calibre: cuesta mantener una esfera líquida de 10 micras quieta en un punto el tiempo suficiente para estudiarla. Lorcan y yo resolvimos este problema construyendo un aparato que confinaba y hacía levitar por un tiempo indefinido una partícula cargada eléctricamente; la fuerza electrostática compensaba la gravedad, como muchos años atrás en el famoso experimento de Robert Mi-

llikan de la gota de aceite. Pero el método de Millikan por sí mismo no proporciona una “trampa”; deja que la partícula se mueva libremente. Para impedir la deriva, el aparato de Lorcan añadía un campo eléctrico oscilante al campo de levitación constante, siguiendo el ejemplo de Wolfgang Paul, que había demostrado, en las investigaciones de los años cincuenta que le valdrían el premio Nobel, que un campo dinámico puede atrapar un ion atómico. Con un campo oscilante diseñado de manera adecuada una gota microscópica se mantiene fija en el aire; es entonces un blanco fácil para el láser y para el microscopio.

El primer espectro que obtuvo Lorcan a partir de una gota en levitación nos dejó sorprendidos. Tenía pensada una serie de experimentos para concentraciones variables, comenzando por las más diluidas, en las que la distancia media entre donantes y aceptores multiplicaba por veinte el alcance máximo del intercambio de Förster, el mecanismo de transferencia de la energía que conocíamos. Por tanto, no esperábamos que apareciese transferencia alguna. Sin embargo, el cociente entre las fluorescencias del aceptor y del donante superó el 10 %.

A medida que Lorcan aumentaba en las gotas la concentración de moléculas aceptoras, el desconcierto fue creciendo. Si el mecanismo de Förster hubiese estado actuando, la cantidad de energía transferida debería haber sido proporcional a la concentración de los aceptores. Pero indagamos una amplia variedad de concentraciones, en un intervalo de unos dos órdenes de magnitud, y vimos que apenas cambiaba la cantidad de energía transportada entre las moléculas. Más aún, en los espectros ópticos, tanto para los donantes como para los aceptores, observamos picos perfectamente definidos. Propiedades tan características nunca habían aparecido en los experimentos que sondeaban esas mismas moléculas en tubos de ensayo con dimensiones del orden de los centímetros. Aunque la explicación no saltaba a la vista, al final estos resultados nos llevaron a remozar las ideas acerca de la transferencia de energía entre las moléculas.



STEPHEN ARNOLD

1. UNA GOTA DE GLICEROL cargada eléctricamente flota inmóvil entre dos electrodos metálicos mientras se la irradia por la izquierda con luz láser. El autor y sus alumnos estudiaron con este dispositivo experimental las transferencias de energía entre dos tipos diferentes de moléculas de colorante mezcladas en la gota. Su descubrimiento de que la energía óptica pasa de un tipo de molécula a la otra con sorprendente eficiencia les llevó a investigar la física de la luz que circula por el interior de esferas microscópicas líquidas, de plástico o vidrio. Las novedosas propiedades ópticas así descubiertas llevan a pensar que las microesferas valdrán para múltiples aplicaciones, del procesamiento de señales a los sensores biológicos.

En un principio pensamos sondear las sutilezas del mecanismo de transferencia de Förster. En él, la energía de un electrón excitado se transfiere a otra molécula sin que durante el proceso se genere ningún fotón. ¿Cómo es posible? Una molécula excitada se comporta como una antena emisora de radio. Cerca de esa fuente de tamaño nanoscópico, el campo eléctrico oscilante es particularmente intenso (aunque decae muy deprisa, con el cubo de la distancia), tanto, que puede llegar a inducir la oscilación de la nube electrónica de una molécula cercana; este acoplamiento transfiere energía si el aceptor reside tan cerca como para que la probabilidad de transferencia sea muy superior a la probabilidad natural de que el donante experimente fluorescencia. No hay fotones implicados en este intercambio; en otras palabras, los donantes no tienen que emitir radiación electromagnética. El proceso de Förster se asemeja a cuando alguien oye dentro de sí un programa de radio porque el campo eléctrico de un radiotransmisor cercano es tan potente que induce corrientes en sus empastes metálicos.

Los radiotransmisores no se han construido para que energicen las bocas de personas cercanas. Sus antenas emiten ondas electromagnéticas hacia lejanos receptores. Lo mismo ocurre con las moléculas excitadas. Si el donante no tiene vecinos cercanos que apresen esta energía, la molécula excitada emitirá un fotón hacia la lejanía (al menos a una distancia de una longitud de onda). Para un aceptor alejado del donante, esa distancia resultará tan grande, que la proba-

El autor

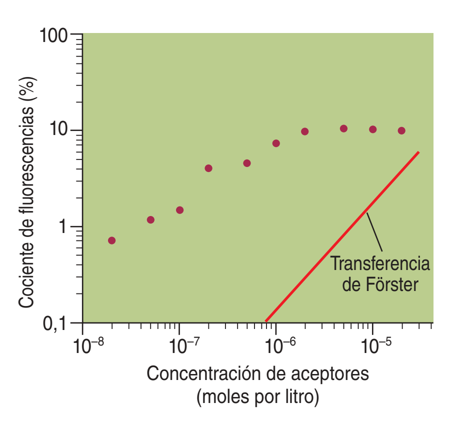
STEPHEN ARNOLD es el director del Laboratorio de Fotofísica de Micropartículas de la Universidad Politécnica de Nueva York, cuya cátedra Thomas Potts de Física ocupa. (Este artículo se publicó en *American Scientist*, volumen 89, págs. 414-421.)

bilidad de que reciba el fotón y absorba su energía será insignificante. Y sin embargo, de esa magnitud era la escala de la separación entre donantes y aceptores en el primer experimento de Lorcan.

¿Qué estaba ocurriendo? Sabíamos que, con una concentración tan baja de moléculas donantes y aceptoras dentro de la gota, el mecanismo de transferencia de Förster no actuaba. Tenían que estar escapando fotones de los donantes y golpeando en los aceptores, y con una eficiencia inesperada. La única explicación razonable era que cada uno de los fotones emitidos retornaba muchas veces a la misma región y de esa forma tenía una gran probabilidad de chocar con un aceptor. Los picos que vimos en el espectro nos dieron una buena pista sobre el mecanismo.

Esos picos eran picos de resonancia, que corresponden a *modos* electromagnéticos especiales de la partícula en su integridad. La situación recuerda a una cuerda de un violín, que admite modos de vibración sólo para frecuencias tales que las correspondientes semilongitudes de onda quepan un número entero de veces a lo largo de la cuerda. Los modos electromagnéticos de una partícula pequeña —o resonancias de Mie— no difieren de los de la cuerda vibrante. También se los describe por su carácter ondulatorio, de una manera que tiene en cuenta complicaciones como la polarización y la difracción. Con todo, hay una descripción más intuitiva de estos modos que subraya la propensión del fotón a volver repetidas veces a una cierta región. H. M. Nussenzveig, de la Universidad Federal de Río de Janeiro, comprendió que si la esfera (la partícula) es mucho mayor que la longitud de onda de la luz en cuestión, las resonancias de Mie pueden representarse como órbitas geométricas. Si no se toma en cuenta la difracción, cabe pensar que los fotones rebotan, describiendo órbitas bien definidas, por el interior de la partícula, donde las encierra la reflexión interna total; se trata del mismo fenómeno por el que la superficie de una piscina parece un espejo cuando alguien mira hacia un lado y arriba bajo el agua.

Ese efecto especular en la piscina se debe a que los rayos procedentes del interior que inciden en la superficie con un ángulo pequeño se reflejan totalmente y vuelven al agua. En buena medida, lo mismo vale en el interior de una partícula transparente, siempre que sea mucho mayor que la longitud de onda. Cuando un rayo de luz incide en la superficie esférica con un pequeño ángulo, rebota hacia adentro. El fotón, rebote a rebote, queda así en el interior de la partícula por un tiempo mucho mayor. En último término, limita el tiempo de vida del fotón la difracción, que quita precisión a las trayectorias de los fotones y permite que vaya escapando energía con el tiempo. Los efectos de la difracción crecen cuando mengua la partícula; cuando su radio se aproxima a la longitud de onda de la luz que circula por su interior, las resonancias desaparecen por completo.



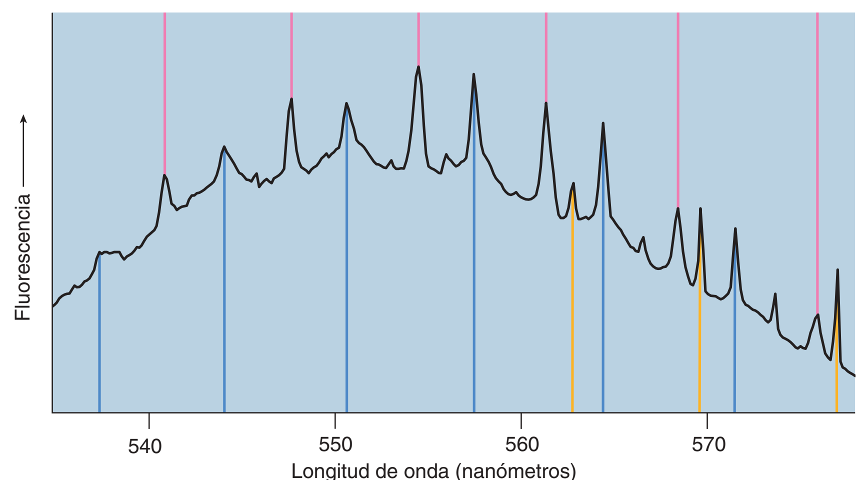
2. LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA entre moléculas de colorante donantes y aceptoras (medida mediante el cociente de sus fluorescencias) resultó ser mucho mayor (*círculos*) que lo predicho por la teoría de Förster (*línea recta*). Esta discrepancia, y la débil dependencia con respecto a la concentración en la mayor parte del intervalo considerado, llevó al autor y a sus alumnos a pensar que la energía debía de transferirse de forma distinta de una molécula a otra en el interior de una gota en levitación.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, nuestras observaciones fueron cobrando sentido. Nos percatamos de la importancia de los modos electromagnéticos especiales de una gota microscópica. Los llamamos modos de átomo fotónico, porque las trayectorias de los fotones recuerdan a las órbitas de los electrones en los átomos. En los modos de más larga vida, los fotones trazan polígonos sencillos, mientras que para los de vida más corta las trayectorias se van cerrando tras la primera revolución por el interior de la partícula. Con nuestros datos y el modelo del átomo fotónico, calculamos que antes de ser absorbidos, o de que se fuguen, los fotones que circulan dentro de una gota de 10 micras de radio, sin aceptores, cubren una distancia total de unos 0,16 metros, es decir, 30.000 veces el diámetro de la esfera.

Al igual que un electrón en el átomo de Bohr, el fotón tiene en una microesfera, o "átomo fotónico", un momento angular orbital cuantificado. Einstein demostró que un fotón tiene un momento proporcional a su energía, la cual por otra parte es proporcional a la frecuencia óptica. El momento angular orbital de un fotón en un átomo fotónico es su momento de Einstein multiplicado por el radio interior del polígono, que para fotones rasantes viene a ser el radio de la partícula. Por tanto, el tener modos separados por un incremento constante del momento angular equivale a que sus frecuencias se espacien regularmente (los picos de verja que Lorcan había descubierto).

Podemos imaginar un modo concreto como una onda que circunda el interior de una esfera diminuta y retorna en fase con las oscilaciones del punto de partida. El modo con el valor de momento angular inmediatamente más alto tiene una frecuencia aumentada justo en la cantidad precisa para encajar una longitud de onda extra en este circuito. Tales propiedades de los átomos fotónicos parecían explicar de una manera nítida lo que estábamos viendo en nuestros experimentos.

Steve Holler, estudiante de licenciatura de quien yo era tutor en ese tiempo, quiso comprobar la hipótesis tomando fotografías de una microgota brillante. Empleó filtros de color que bloqueaban la luz de las emisiones de donantes y aceptores por separado. La imagen correspondiente a los aceptores aumentó muchísimo nuestra confianza, ya que la luz se concentraba cerca de la superficie, por donde circulan los fotones en un átomo fotónico. La imagen correspondiente a los donantes era menos interesante. Se iluminaba casi todo el interior. Mostraba, eso sí, una asimetría característica: la gota esférica enfocaba gran parte de la luz láser incidente sobre su parte trasera. Para nuestra sorpresa, la imagen correspondiente a los aceptores no presentaba diferencias entre las partes trasera y delantera. En cambio, aparecían dos curiosos puntos brillantes diametralmente opuestos.



3. EL ESPECTRO DE LA LUZ emitida por las moléculas aceptoras dentro de una gota muestra una serie de picos, que corresponden a los distintos modos electromagnéticos resonantes. Los picos que se muestran aquí representan los modos de tres familias (*rosa, azul y amarilla*). Para cada familia, los picos se espacian regularmente, reflejo de la cuantificación del momento angular de los fotones que circulan dentro de la gota.

Entendimos estos fenómenos cuando caímos en la cuenta de que las moléculas donantes excitadas en la parte de atrás de la gota lanzan fotones a cada "azimut". Imaginemos un aeropuerto del que parten aviones en todas las direcciones. A cada piloto se le ha ordenado que siga un círculo máximo. Los aviones confluirán en los antípodas, en el otro lado del globo. A menos que choquen en el aire, volverán al punto de partida, y así una y otra vez. De manera semejante, la concentración de la emisión de los donantes en la parte trasera de una microesfera envía fotones a lo largo de círculos máximos que se cortan en dos puntos antípodas, los dos puntos brillantes en la imagen de fluorescencia del aceptor. Ya que nuestra imagen promediaba muchas revoluciones de los fotones de un lado a otro de la esfera, la fotografía era totalmente simétrica, como si hubiésemos tomado una exposición fotográfica larga de un péndulo oscilante durante un intervalo de tiempo mucho más largo que una oscilación.

Le medimos a la transferencia de energía en la esfera una eficiencia global de alrededor de un 10 %. Pero la imagen correspondiente al aceptor demostró que la transferencia sólo tiene lugar en una fina capa cercana a la superficie; la mayor parte de las moléculas donantes no participan. Sólo una de cada cinco transferían; para ellas la eficiencia se acercaba al 50 %. Noel Goddard, estudiante de maestría que trabajaba en mi laboratorio, elevó el rendimiento global hasta ese 50 %; confinó todas los donantes justo bajo la superficie de la gota. Pero incluso con los donantes en el sitio adecuado, debe aún aclararse por qué emiten fotones con tanta eficiencia en las direcciones especiales necesarias para que se den los modos de átomo fotónico. La respuesta necesita una breve disquisición previa acerca de la razón por la cual un átomo o molécula excitados emiten luz.

El papel del vacío

Recuerdo que cuando estudiaba mecánica cuántica, en el doctorado, el profesor explicó que los estados excitados del hidrógeno son estacionarios desde un punto de vista matemático. Pero el átomo tenía que emitir un fotón si estaba excitado. Le pregunté: "Que sean estacionarios, ¿significa que si me guardo un átomo de hidrógeno excitado en el bolsillo, me voy a casa y vuelvo mañana, el átomo seguirá todavía excitado?" El profesor me confirmó que no, mostrando cierta incomodidad por el rumbo que tomaba la discusión. Insistí: "Entonces, ¿cuánto tiempo seguirá así?" Me respondió que unos nanosegundos. "¿Y eso es estacionario?", le repliqué. El profesor no tenía mucho más que añadir, excepto recordarme que ya habíamos hecho cálculos sobre la emisión estimulada.

En la emisión estimulada el paso de un fotón cercano induce el retorno al estado fundamental de un electrón excitado. La energía del fotón inductor debe ser igual a la diferencia de energía entre esos dos niveles. La emisión produce un segundo fotón de características idénticas a las del primero. Es el proceso que posibilita los láseres, pero me resulta mucho menos interesante que la emisión espontánea, que proporciona casi toda la luz que vemos. El Sol, las lámparas de incandescencia, las lámparas fluorescentes, incluso las libélulas brillan sin que necesiten fotones externos que disparen la emisión. Einstein se valió de argumentos termodinámicos para demostrar la necesidad de ambas emisiones, la estimulada y la espontánea, pero no fue capaz de ofrecer una explicación de la segunda. Su mecanismo tampoco puede obtenerse a partir de la mecánica cuántica de los átomos. La respuesta se logró solamente después de 1948, cuando se tuvo de verdad en cuenta que el campo electromagnético del espacio vacío está cuantificado.

En el bachillerato se nos enseñó que si sacásemos todos los átomos,

moléculas y fotones de un recipiente, éste no contendría nada. Es una idea incorrecta. Incluso en un recipiente frío, mantenido cerca del cero absoluto, un átomo excitado estará bañado por fluctuaciones electromagnéticas, particularmente intensas cuando la longitud de onda de las líneas de emisión del átomo coincida con la de un modo resonante. Estas fluctuaciones derivan de un principio de incertidumbre de Heisenberg electromagnético: el producto de los campos eléctrico y magnético de un modo tiene un mínimo fijo, es decir, ambos campos no pueden anularse a la vez. Incluso en un contenedor vacío y completamente oscuro, cada modo electromagnético tendrá una "energía del punto cero" residual, igual a su frecuencia multiplicada por una constante.

Los campos variables con el tiempo asociados a la energía del punto cero disparan la emisión espontánea, que en este sentido es bastante similar a la estimulada, si bien, en su caso, el origen del estímulo resulta bastante sutil. El físico holandés H. B. G. Casimir arguyó hace décadas que esas fluctuaciones cuánticas originan además presiones. Dos placas metálicas neutras se atraen con una fuerza que aumenta a medida que su separación disminuye. Una explicación sencilla es que el espacio limitado entre las placas permite menos modos electromagnéticos que las regiones de alrededor, lo que da lugar a un empuje neto hacia adentro.

Se piensa que el universo tiene un número infinito de modos electromagnéticos y una densidad de energía del punto cero que aumenta continuamente con la frecuencia. Dentro de un volumen cerrado, el espectro de la densidad de energía se concentra en torno a frecuencias discretas, cada una asociada con un modo particular. A medida que el tamaño del recipiente se reduce, un modo con una frecuencia dada ocupa un volumen menor y en consecuencia tiene una densidad de energía de punto cero más alta. Si el recipiente mide sólo unas pocas longitudes de onda, las densidades de energía del punto cero para un modo pueden exceder en varios órdenes de magnitud a las densidades de energía del espacio vacío. Como resultado, no cuesta inducir a una molécula excitada, que en otras circunstancias emitiría radiación en una ancha banda de frecuencias, a que emita fotones en el modo de que se trate, a condición de que la banda de emisión contenga la frecuencia correspondiente.

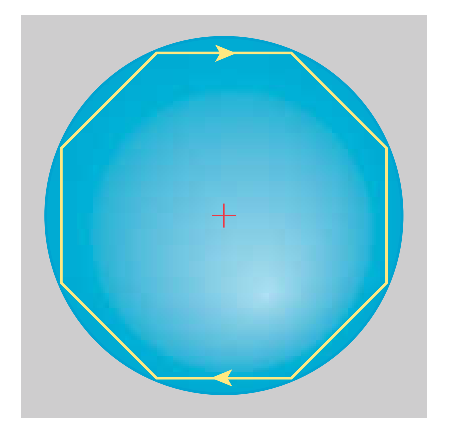
Aunque las gotas diminutas que investigué con mis alumnos no son cavidades vacías, confinan a los fotones dentro de ciertos modos en una pequeña región; vienen a actuar como las cavidades vacías. Por tanto, no es sorprendente que valga para ellas la física de la nada. Los cálculos detallados confirman que las fluctuaciones cuánticas reforzadas de los modos de átomo fotónico explican los rendimientos observados de la transferencia de energía. De manera coherente con este resultado, encontramos experimentalmente que la eficiencia de la transferencia de energía aumenta aún más cuando el tamaño de la partícula se reduce a un diámetro de 5 micras. Se debe a un fenómeno de la electrodinámica cuántica, el efecto de cavidades.

Una aplicación importante de este efecto es el láser miniaturizado, dispositivo semiconductor presente en los punteros e impresoras láser y en los reproductores de discos compactos. Abundan hoy tanto, que no es difícil que se olvide el significado de la palabra *láser*: amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. Una fracción substancial de la potencia comunicada a un láser de semiconductor se desaprovecha porque existe una corriente mínima sin la cual no se establece el proceso láser. Las pérdidas de potencia asociadas con este umbral pueden disminuirse mucho aprovechando el efecto de cavidades. Para ello hay que reducir aún más los láseres.

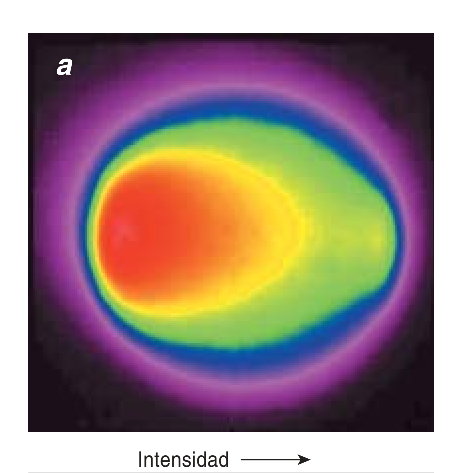
El proceso láser parte siempre de la emisión espontánea. Pero en los dispositivos ordinarios sólo una diminuta fracción de los fotones generados espontáneamente (menos del uno por mil) opera en el modo láser. Por tanto, se necesita una potencia considerable para conseguir un numero de estos fotones suficiente para que el láser arranque. En este punto es donde las dimensiones menguantes y el efecto de cavidades nos ayudan. Cuando se reduce el tamaño de la cavidad láser se limita el número de modos disponibles. En principio, puede construirse una cavidad tan pequeña que el espectro de emisión del material emisor sólo coincida con un modo. La pequeñez de la cavidad da lugar entonces a un reforzamiento de las fluctuaciones cuánticas y a una rápida emisión en ese modo.

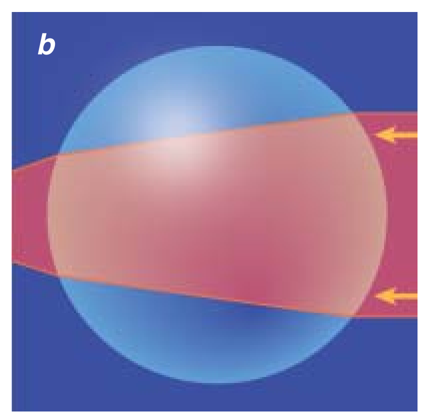
No hace mucho, varios laboratorios se han valido del confinamiento de los fotones en pequeñas partículas esféricas para fabricar láseres de umbral bajo. Este elegante procedimiento tiene, sin embargo, sus límites, ya que el confinamiento de modos se pierde cuando el tamaño de la esfera se aproxima a la longitud de onda de la luz. Por lo tanto, puede que no sea posible eliminar del todo la corriente umbral. A pesar de ello, se obtienen con las microesferas láseres de rendimiento muy alto.

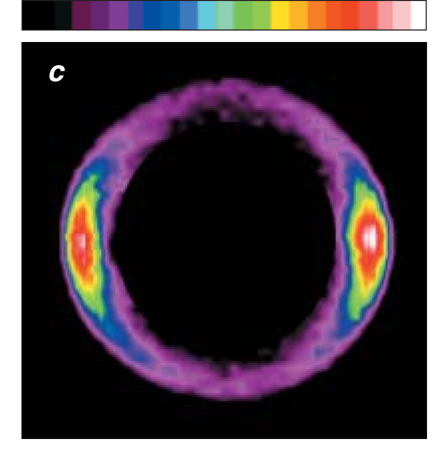
Las microesferas también dan lugar a filtros ópticos de excepcional pureza espectral, ya que mantienen la energía de un fotón durante un tiempo, largo en comparación con el período de una oscilación de la correspondiente onda luminosa. Una esfera diminuta es como una delicada copa de vino que, golpeada con

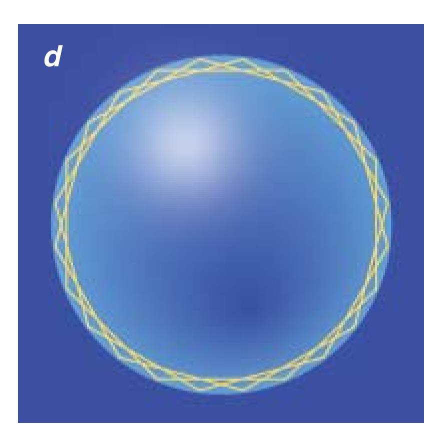


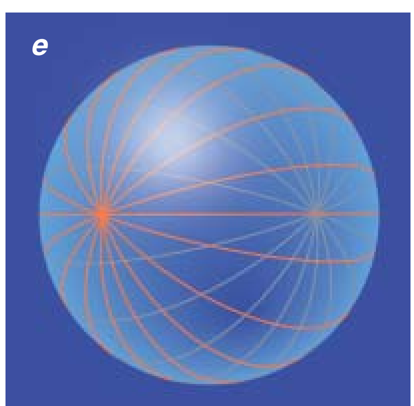
4. LOS RAYOS DE LUZ QUE REBOTAN en la cara interna de la superficie de una gota esférica tras incidir en ella con ángulos pequeños experimentan reflexión total. En el ejemplo que aquí se muestra, un fotón completa una revolución por la esfera después de ocho rebotes; describe una trayectoria octogonal. Un fotón medio recorrerá esta órbita muchas veces dentro de la gota microscópica antes de que sea absorbido o escape.











5. LA LUZ EMITIDA por los donantes dentro de una gota muestra una clara asimetría (*a*) porque el rayo láser que los excita se enfoca hacia la izquierda. (*b*). La luz emitida por los aceptores muestra un patrón de anillos (*c*); demuestra que sólo se excitan los que están cerca de la superficie de la gota. La mayor parte de la luz emitida por los donantes escapa antes de encontrarse con un aceptor. Solamente los fotones en un modo resonante, que circulan justo por debajo de la superficie (*d*), permanecen dentro de la gota el tiempo suficiente para que sea apreciable la probabilidad de que choque con los aceptores. Son posibles muchas órbitas anulares, pero todas se juntan en dos puntos antípodas (*e*), dos manchas brillantes, diametralmente opuestas, en la imagen correspondiente a los aceptores (*c*).

STEPHEN ARNOLD (*imágenes a y c*)

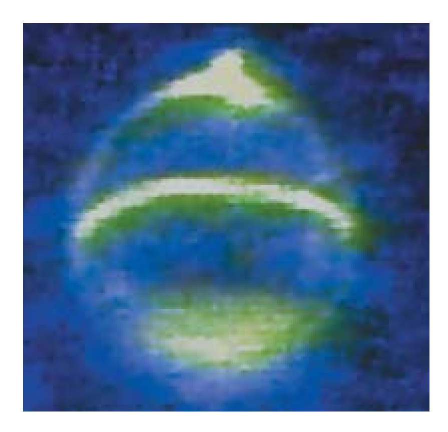
una cuchara, emita una nota prolongada pese a que cada oscilación acústica no dure más de un milisegundo. Guarda relación con esta propiedad el que la copa sólo responda a la estimulación externa de un estrecho intervalo de frecuencias; sólo una nota precisa la romperá. Las microesferas también responden a la excitación de un intervalo de frecuencias muy estrecho.

Para los sistemas ópticos cuánticos, esta noción física fundamental se encierra en otro principio de indeterminación de Heisenberg: para un modo dado, el producto del ancho de frecuencia y la vida media de un fotón tiene un valor mínimo de $\pi/2$. A partir de nuestros experimentos de transferencia de energía, determinamos que un fotón rebota por el interior de una microesfera de 10 micras durante unos 3 nanosegundos antes de que lo absorba el material o escape. En consecuencia, el mínimo de la anchura de frecuencia es de unos 50 megahertz. Aunque a un ingeniero de telecomunicaciones pueda parecerle un ancho de banda muy grande, en realidad resulta muy pequeño para la comunicación óptica. Para entender lo angostos que son 50 megahertz en este contexto, pensemos en cómo separarían por medio de esferas de esa naturaleza las señales que la luz transporta a lo largo de una fibra óptica.

Lo ideal sería usar múltiples microesferas de tamaños un poco diferentes, de modo que cada una sirviese para seleccionar una banda particular de información. El número de canales distintos disponibles depende de que se distinga de los modos adyacentes (aquellos que tienen los valores siguiente o anterior del momento angular) una resonancia concreta en la esfera. Para una esfera de unas 10 micras de radio, esos modos están separados por unos 3000 gigahertz. Así pues, en principio cabría distinguir $(3 \times 10^{12})/(5 \times 10^{7})$ canales diferentes, es decir, 60.000. En la práctica, la distorsión de las esferas reduciría seguramente el número de canales a unos 10.000, lo que todavía constituiría un logro técnico asombroso.

En 1995, dos miembros de mi grupo de investigación, Ali Serpenguzel y Giora Griffel, y yo informamos de un procedimiento que separaba las señales ópticas de esa manera. Depende de otro principio de la mecánica cuántica, el efecto túnel. Si se coloca una microesfera de vidrio, digamos, o de plástico, a una longitud de onda de distancia del núcleo —el alma— de una fibra óptica, habrá una probabilidad razonable de que un fotón que viaje por la fibra excite un modo de átomo fotónico en la esfera, a condición de que la frecuencia de ese fotón coincida con la del modo. Se dice entonces que el fotón atraviesa la zona prohibida que le separa de la esfera gracias al efecto túnel resonante.

Los fotones que circulan por la esfera también pueden pasar por efecto túnel a la fibra, si antes no se fugan. Aunque las fugas pudieran parecer dañinas, son sin embargo muy convenientes, ya que pro-



6. EN LA MICROESFERA LASER brilla un anillo por el que circula la mayoría de los fotones. Esta geometría se debe a que una fibra óptica, tendida en el plano del anillo, toca la esfera en un punto del ecuador. Los fotones que circulan por la fibra pasan a la esfera y excitan la acción láser para ese modo electromagnético particular.

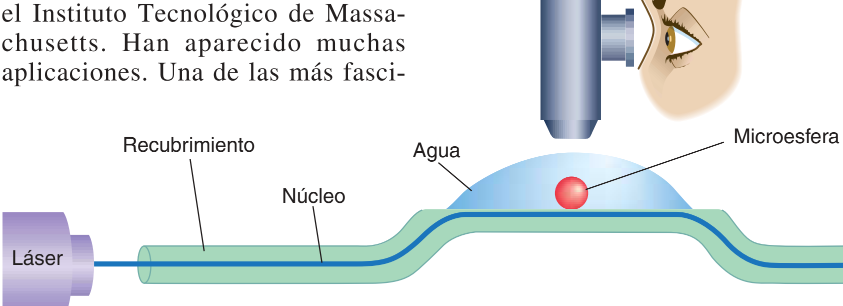
porcionan información sobre lo que ocurre dentro de la microesfera. Así, investigamos primero el efecto túnel observando la luz que se fugaba de una microesfera de poliestireno. La colocamos encima de una fibra óptica que había sido pulida para eliminar casi todo el recubrimiento, excepto una fina película. Iluminamos la fibra con un láser sintonizable, cuya frecuencia variamos a la vez que observábamos la microesfera perpendicularmente. Para la mayoría de las frecuencias, no había, aparte de unos tenues brillos de luz dispersados por la superficie pulida de la fibra, más que oscuridad; pero cuando la frecuencia del láser coincidió con un modo de átomo fotónico, la esfera se iluminó gracias a los fotones que se fugaban.

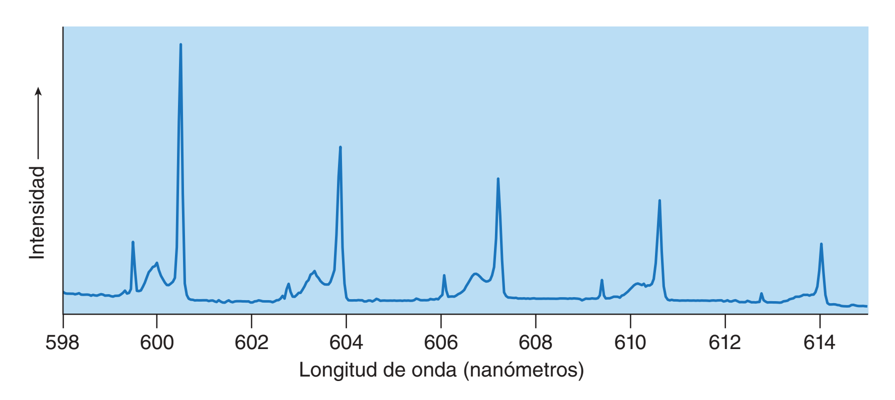
Sólo un mes después de que publicásemos un artículo sobre nuestro trabajo, encontraron en la Escuela Normal Superior de París una prueba distinta del efecto túnel fotónico entre una fibra óptica y una microesfera. Cuando la frecuencia se ajustaba a la de un modo de átomo fotónico, observaron una disminución de la luz transmitida a lo largo de la fibra. Esa disminución en la transmisión surge en parte porque las fugas y la absorción en la esfera reducen la probabilidad de que los fotones vuelvan a la fibra. Pero la simple imagen de unos fotones que saltan entre la esfera y la fibra olvida el carácter ondulatorio de la luz y pierde así un efecto físico importante: la interferencia destructiva que puede tener lugar cuando la luz entra de nuevo en la fibra tras una permanencia larga en la esfera. Griffel y yo describimos este fenómeno en 1996. Después, otro grupo, dirigido por Kerry Vahala, del Instituto Tecnológico de California (Caltech), obtuvo una eficiencia cercana al 100 por cien para el acoplamiento de la luz entre una fibra óptica y una microesfera. Con su dispositivo experimental, apenas si hay en el régimen resonante transmisión a lo largo de la fibra.

Muchos puntos de luz

Nuestros experimentos con esferas de plástico diminutas y fibras ópticas contribuyeron a que se abriera un nuevo campo de investigación. No cabe mejor denominación para él que "fotónica de microesferas". Los centros que trabajan en esta área son ahora el Caltech y el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Han aparecido muchas aplicaciones. Una de las más fascinantes se ha ideado en el laboratorio de Vahala. Allí se induce a los fotones de una frecuencia específica a pasar por efecto túnel resonante a una esfera y después a una segunda fibra. Este dispositivo fotónico constituye un *filtro de adición y eliminación*. Bien añade, bien elimina la señal que se transmite a través de un canal óptico dado; así se enruta información de unas fibras ópticas a otras a frecuencias seleccionadas sin tener que emplear circuitos electrónicos en absoluto.

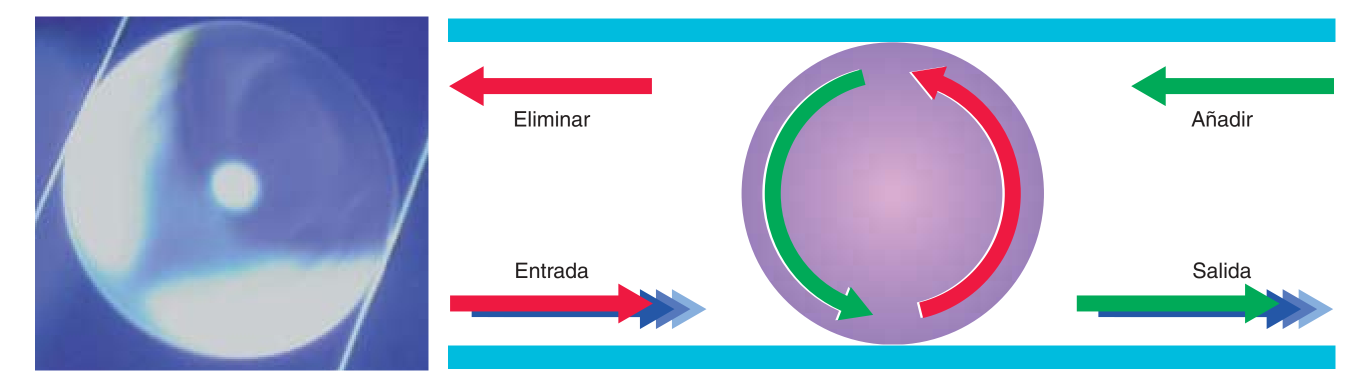
Las microesferas de plástico valen también como sensores: sus modos de átomo fotónico cambian de frecuencia cuando la temperatura varía o cuando están en contacto con un material con propiedades ópticas similares, por ejemplo con moléculas de ADN pegadas a su superficie, posibilidad que ahora estoy investigando con mi compañero Iwao Teraoka y con Frank Vollmer, de la Universidad Rockefeller. La idea consiste en pegar a





7. UNA MICROESFERA SITUADA A UNA DISTANCIA de sólo una longitud de onda del núcleo de una fibra óptica absorbe fácilmente fotones de ésta cuando la frecuencia de la luz que pasa por la fibra coincide con un modo resonante de la esfera (*arriba*). En condiciones de resonancia, los fotones entran en la esfera y con el tiempo escapan en todas las direcciones; se generan así picos bien definidos cuando se representa la intensidad de la luz emitida por la esfera en función de la longitud de onda de la excitación láser (*abajo*).

CORTESIA DE KERRY VAHALA, CALTECH (*imagen superior*)



8. UNA MICROESFERA ACOPLADA a dos fibras ópticas (*izquierda*) constituye un filtro de adición y eliminación. Una señal óptica enviada hacia la esfera a lo largo de una fibra (*flecha verde, arriba a la derecha*) se suma a las muchas señales que viajan por la otra fibra (*flechas azules*). Este dispositivo vale también para eliminar una señal (*flecha roja, arriba a la izquierda*) que viaja por una fibra junto con muchas otras.

CORTESIA DE KERRY VAHALA, CALTECH (*imagen superior izquierda*)

una microesfera muchas hebras de ADN con una secuencia de bases particular. El material genético con la secuencia complementaria se adherirá a la superficie de esta esfera. Cuando ocurre tal cosa, el recubrimiento añadido (como la dilatación que acompaña al calentamiento) modifica el radio efectivo de la partícula, lo que fuerza el cambio de la frecuencia resonante para un modo determinado. Otros tipos de osciladores también son sensibles a los cambios de tamaño. Por ejemplo, la frecuencia de un péndulo cambia cuando la barra que conecta la bola al eje se expande térmicamente. Pero los péndulos no dan lugar a buenos termómetros. Sorprenderá que las microesferas tengan, en cambio, una sensibilidad alta; no obstante, al menos en principio, la tienen.

Que el momento angular para un modo particular sea constante implica que la disminución fraccional de la frecuencia debe ser igual al aumento fraccional de la dimensión, y viceversa. El cambio mínimo de tamaño que puede detectarse es igual al mínimo cambio fraccional mensurable de la frecuencia multiplicada por el radio de la esfera. No cuesta observar un cambio de frecuencia coincidente con la anchura de línea, unos 50 megahertz, que para una frecuencia óptica típica corresponde a un cambio fraccional en tamaño de una parte en 10 millones. Por lo tanto, cabe discernir en principio un cambio de 10^{-12} metros para una esfera de 10 micrometros de radio, lo que equivale a una centésima parte de un diámetro atómico. Esta sensibilidad abre la puerta a una serie de aplicaciones, desde la termometría a los sensores biológicos; gracias a esferas de distintos tamaños, cabría consultar por medio de una sola fibra múltiples sondas que contaran con especificidad suficiente para detectar la actividad de genes particulares.

Da sus frutos tratar a las esferas diminutas como átomos fotónicos. Pero se puede dar un paso más y extender la analogía hasta el entorno molecular. El equipo de Makoto Kuwata-Gonokami ha construido hace poco en la Universidad de Tokio el equivalente fotónico de una molécula de hidrógeno. En el H_2, dos protones comparten dos electrones en un enlace covalente. Los estados electrónicos se desdoblan. Pusieron en contacto un par de microesferas fluorescentes casi idénticas y registraron un desdoblamiento similar en los modos de átomo fotónico. De manera muy apropiada, dieron a su creación el nombre de molécula fotónica.

Se siguen investigando maneras ingeniosas de sacar partido de las propiedades ópticas de las esferas diminutas. Cabe imaginar, por ejemplo, que el agrupamiento de más de dos esferas dará lugar a modos ópticos todavía más interesantes o útiles. En el futuro podrían formarse incluso “polímeros” fotónicos. Cualesquiera que sean los avances posteriores, siento una gran satisfacción recordando los experimentos de los años ochenta que me condujeron al campo de la fotónica de microesferas, aquel empeño por sondear la transferencia, sin fotones, de energía entre las moléculas. Aunque fallé en el intento, ahora comprendo que no habría podido esperar nada mejor.

Bibliografía complementaria

ENHANCED ENERGY TRANSFER WITHIN A MICROPARTICLE. L. M. Folan, S. Arnold y S. D. Druger, en *Chemical Physics Letters*, vol. 118, págs. 322-327; 1985.

ENERGY TRANSFER AND THE PHOTON LIFETIME WITHIN AN AEROSOL PARTICLE. S. Arnold y L. M. Folan, en *Optics Letters*, vol. 14, págs. 387-389; 1989.

ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA EN CAVIDADES. Serge Haroche y Jean-Michel Raimond, en *Investigación y Ciencia*, págs. 51-59; junio, 1993.

EXCITATION OF MORPHOLOGICAL RESONANCES FROM INDIVIDUAL MICROPARTICLES AND CLUSTERS IN CONTACT WITH AN OPTICAL FEBER. A. Serpenguzel, S. Arnold y G. Griffel, en *Optics Letters*, vol. 20, págs. 654-656; 1995.

IMAGING ENHANCED ENERGY TRANSFER IN A LEVITATED AEROSOL PARTICLE. S. Arnold, S. Holler y S. D. Druger, en *Journal of Chemical Physics*, vol. 104, pág. 7741-7748; 1996.

TIGHT BINDING PHOTONIC-MOLECULE MODES OF RESONANT BISPHERES. T. Mukaiyama, K. Takeda, H. Miyazaki, Y. Jimba y M. Kuwata-Gonokami, en *Physical Review Letters*, vol. 82, pág. 4623-4625; 1999.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Reflexiones sobre la reflexión

Desde el jardín vemos al niño en el salón. Nuestro débil reflejo se superpone a su silueta infantil en la estancia iluminada. De pronto, gira el batiente de la ventana suavemente con el aire de la tarde y nos proyecta sobre la cara el disco incandescente del Sol. Tales juegos de imágenes y reflejos se deben a las leyes de la reflexión y la transmisión de la luz. ¿Realmente nos apercibimos de ellas?

En los materiales transparentes, la luz se propaga sin sufrir una gran absorción. ¿Son por consiguiente el aire, el agua e incluso el vidrio ópticamente equivalentes? No, ya que la luz interactúa de modos diferentes con las moléculas de esos medios, en los que se propaga a velocidades distintas. Del orden de 300.000 kilómetros por segundo en el vacío, esa velocidad sólo se reduce un 0,03 por ciento en el aire. En cambio, en un medio denso como el agua, es de 225.000 kilómetros por segundo. Para caracterizar el fenómeno se emplea el índice de refracción del medio, el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y en el medio. Así, el índice de refracción del agua vale 1,33 y el del cristal de la ventana alrededor de 1,5.

Reflexión total

La diferencia entre los índices de refracción de dos medios transparentes contiguos tiene algunas consecuencias. Primero, una parte de la luz se refleja y una parte se transmite. La parte reflejada se refleja con el mismo ángulo con que llegó al medio. La parte transmitida se desvía: cuando un rayo de luz pasa de un medio de índice bajo (poco refringente) a un medio de índice alto (más refringente), del aire al agua, digamos, se acerca a la perpendicular de la superficie que los separa, o interfase. ¿Y por qué? Porque, tal y como demostró Fermat (1601-1665), el trayecto de un rayo de luz entre dos puntos, uno en el aire, otro en el agua, es el de duración mínima. Como la velocidad de la luz disminuye en el medio de índice más alto, el rayo hará por permanecer el menor tiempo posible en él; se acercará, pues, más a la normal —la distancia más corta entre un punto y la interfase—. Como el agua es más refringente que el aire, un palo inclinado, sumergido en parte, lo veremos acodado; su extremo nos parecerá que se encuentra menos hondo de lo que en realidad está. Los efectos angulares de la diferencia de índices se compensan si los rayos atraviesan una segunda interfase (vidrio-aire) igual a la primera (aire-vidrio) para retornar al aire. Sin ese efecto, las ventanas falsearían las posiciones de lo que viéramos a través de ellas.

¿Cuál es la fracción de luz reflejada? El físico francés Louis Augustin Fresnel mostró en el siglo XIX que la intensidad reflejada es tanto mayor cuanto mayor es la diferencia entre los índices de refracción de los dos medios. Se refleja un cuatro por ciento de la intensidad de un haz luminoso que incide frontalmente en una interfase aire-vidrio. En un cristal de ventana se refleja el ocho por ciento, al haber dos superficies.

Detengámonos unos instantes en estas cifras. Los reflejos no nos molestan cuando miramos por una ventana a pleno día, pero aparecen poco a poco a medida que cae la noche. Cuando el ocho por ciento de luz interior reflejada exceda a la intensidad de la luz exterior, dejaremos de ver el exterior. No obstante, aún podremos acercarnos a la ventana a fin de rebajar la intensidad del reflejo parásito debido a la luz de la habitación. En noche cerrada, tendremos que apretar la nariz contra el cristal y aislar los ojos de la luz ambiente con ayuda de las manos. La reflexión del cuatro por ciento que caracteriza a la interfase aire-vidrio reviste también una gran importancia en los dispositivos ópticos complejos. Así, cinco lentes harán que la intensidad luminosa disminuya en un tercio ($1 - 0{,}96^{10}$); las reflexiones parásitas múltiples reducirán la calidad de la imagen. Esa es la causa de que las lentes empleadas en teleobjetivos, microscopios, gemelos u otros instrumentos reciban tratamientos antirreflectantes.

Cuando ambos medios tienen el mismo índice de refracción, no se refleja luz alguna en la interfase; parece como si no existiese. Este fenómeno se aprovecha para reparar los parabrisas un poco dañados por un guijarro. Allá donde se haya astillado el vidrio, se inyecta un líquido de índice de refracción igual del vidrio (1,5). Cuando ya no haya aire en el intersticio, la fisura que



1. Los pasajeros de un tren serán tanto más visibles cuanto mejor transmita el vidrio la luz que emitan, puesto que su ángulo de incidencia es pequeño. Además, la reflexión de la luz parásita exterior resulta tanto mayor cuanto más lejos está la ventana; a los pasajeros más cercanos se les ve más nítidamente

BRUNO VACARO



2. Los prismas reflectores reorientan los haces luminosos sin debilitarlos ni alterarlos. Infalibles y prácticos, son muy utilizados

BRUNO VACARO

estorbaba la visión se hace invisible. Hay que ser prudentes: el parabrisas seguirá siendo más frágil.

Cuanto más oblicua llega la luz, tanto más se refleja. Así, un cristal de ventana refleja casi del todo un rayo que lo rase: he aquí por qué los escaparates de los almacenes que se extienden a lo largo de las aceras devuelven tan bien los reflejos de las farolas y de los faros de los coches. Cuando los rayos se propagan en un medio más refringente hacia un medio menos refringente, puede que se refleje toda la luz. Más allá de un cierto ángulo de incidencia límite, no se transmite luz alguna hacia el medio de índice inferior. La interfase de ambos medios se convierte en un espejo perfecto. Para ver al pescador, un pez debe situarse en la proximidad de la normal a la superficie del agua; si no, sólo verá, por reflexión, a sus congéneres.

En el caso del vidrio ordinario y el agua, ese ángulo límite por encima del cual se refleja la totalidad de la luz es de 42 grados con respecto a la perpendicular a la interfase; de 49 grados para la interfase agua-aire y de 63 grados para la interfase vidrio-agua. Tan notable diferencia entre los ángulos límite vidrio-aire y vidrio-agua se aprovecha en los detectores automáticos de lluvia de los automóviles. Un diodo electroluminiscente situado dentro del vehículo emite un pincel luminoso que va a dar en la cara externa del parabrisas con un ángulo de unos 45 grados. Como este ángulo es superior al ángulo límite vidrio-aire, la luz se refleja entera hacia el interior, donde un fotodiodo la recupera. Esa señal se altera cuando las gotas de lluvia caen en el lugar donde el pincel luminoso toca el parabrisas: cuando la interfase vidrio-agua que las gotas forman con el parabrisas recibe el pincel luminoso, deja pasar una parte de éste, ya que le llega bajo un ángulo inferior a 63 grados. La caída de intensidad luminosa en el fotodiodo provoca el funcionamiento automático de los limpiaparabrisas.

De la reflexión total se saca partido para construir prismas reflectores. Se los utiliza para reorientar haces luminosos; poseen la ventaja de ser más prácticos que los espejos. Por ello se los encuentra en numerosos dispositivos ópticos de robustez obligada, tales como las cámaras "réflex" o los gemelos. En estos últimos son indispensables porque la separación entre los objetivos necesaria para que se vea a lo lejos excede a la de nuestros ojos. Por tanto, hay que "juntar" los rayos para que lleguen a los ojos.

La eficacia de los prismas reflectores troncocónicos es tal, que funcionan incluso a distancias astronómicas. Su peculiaridad consiste en que reenvían todos los rayos luminosos en la misma dirección por la que llegan. Los astronautas de la misión *Apolo XI* depositaron en la superficie lunar prismas reflectores compuestos de numerosos troncos de cono de algunos centímetros de lado contiguos. Tienen la misma estructura que los catadióptricos de las bicicletas. Reflejan los potentes impulsos de láser que les envía el observatorio del CERGA, cercano a Niza. La medición de los tiempos de ida y vuelta de los impulsos determina sin interrupción la distancia y las variaciones de la distancia entre la Tierra y la Luna con un error de milímetros. Así se verifican teorías acerca del movimiento de los astros.

En la práctica, la complejidad de las superficies y haces luminosos es tanta que se da una variedad de situaciones infinita. ¡Bastante será que distingamos los efectos de la refringencia, los de la ley de Fresnel e incluso la manifestación de un ángulo límite! Para darnos cuenta de la complejidad luminosa ambiental, recurramos a un ejemplo "sencillo" de complejidad: la rugosidad de las superficies. Hasta aquí hemos supuesto interfases lisas, en las que los rayos incidentes se reflejan como en un espejo. Ahora bien, la mayoría de las superficies son rugosas. A la escala de un pincel luminoso, la mayoría de las superficies parecen compuestas de miles de facetas de orientación diversa. Por ello, los rayos que componen un pincel luminoso se reflejan en todas las direcciones, fenómeno que los físicos denominan reflexión difusa. Otro ejemplo lo tenemos en las pequeñas ondulaciones de la superficie del agua que reenvían la luz en direcciones múltiples. Es la causa de que veamos diferentes imágenes del Sol y de la Luna. Vemos una imagen cuando el ángulo de incidencia de la luz de un astro es igual, en una parte de la superficie del agua, al ángulo de reflexión del rayo que incide en nuestro ojo.

Humedad sombría

Las reflexiones difusas "ensombrecen" también la humedad. Así, numerosos cuerpos —los cabellos, la arena, las telas, hasta el asfalto— se muestran más oscuros cuando están húmedos. Uno de los mecanismos que contribuyen a ello es la captación de la luz por la delgada película de agua que cubre la superficie. De la luz que llega a una superficie rugosa, tras atravesar una interfase aire-agua, el material absorbe muy poca; más que nada, se difunde en todas las direcciones. Ciertos rayos reenviados hacia la interfase agua-aire la atraviesan, pero otros se reflejan porque inciden con un ángulo mayor que el límite de 49 grados. Reenviados, así hacia el material, vuelven a ser parcialmente absorbidos y reflejados. Al devolver menos luz que cuando está seca, una superficie mojada parece más oscura. Esta captación de la luz explica el oscurecimiento del asfalto, de las pizarras escolares y de muchas otras superficies rugosas.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

Números y palabras

Para la mayoría de la gente los números y las palabras pertenecen a reinos separados e incluso antagónicos. O se es "de letras", o "de ciencias", y cada materia pertenece a uno u otro campo sin posibilidad de conexión entre sí. Sin embargo, desde hace varias décadas, existe una disciplina que aplica técnicas matemáticas al estudio del lenguaje: la *lingüística matemática*. Una parte importante de esta disciplina es la *lingüística cuantitativa,* que consiste en el estudio estadístico de textos, facilitado por la mayor potencia y capacidad de memoria de los ordenadores actuales.

Vamos a explorar algunas curiosidades de esta lingüística cuantitativa utilizando textos que se pueden encontrar en Internet: *Don Quijote*, *Cien años de soledad* y el original en inglés del *Ulysses* de Joyce. Los he analizado por medio de *TextStat*, un programa gratuito que realiza estadísticas elementales de cualquier texto, creado por la Universidad Libre de Berlín. Se pueden encontrar muchos programas como éste en Internet, algunos gratuitos y otros comerciales, bajo el nombre genérico de *Natural Language Processing (NPL) software* (programas para el procesamiento del lenguaje natural). Han sido diseñados para tratar aspectos gramaticales del lenguaje, para administrar grandes conjuntos de textos que se denominan *corpus,* para encontrar *concordancias,* es decir, las apariciones de una determinada palabra en un corpus, y para algunas otras funciones relacionadas con el estudio matemático del lenguaje.

Uno de los primeros hallazgos de la lingüística cuantitativa fue la llamada *ley de Zipf*, una sorprendente regularidad en el modo como se distribuyen las palabras en un texto de cualquier lengua. Se toma un texto suficientemente largo y se cuenta el número de veces que aparece en él cada palabra. Hay palabras comunes, como "el", "de" o "que", que aparecerán un gran número de veces, y otras más raras que sólo aparecerán una vez. A continuación colocamos las palabras en una lista, ordenándolas de más a menos frecuentes. El orden que una palabra ocupa en la lista se denomina *rango*. Así, en el caso de *Cien años de soledad*, el rango de "de" es 1, el de "la" es 2, el de "que", 3, el de "y", 4, el de "el", 5, etc. Pues bien, la ley de Zipf afirma que la frecuencia f de una palabra dada es inversamente proporcional a su rango r, es decir:

$$f = a/r$$

en donde a es una constante que depende del texto utilizado. Se trata evidentemente de una ley aproximada: puede dar valores de f que no correspondan a la aparición un número entero de veces de las palabras. Una generalización de la ley, también aproximada pero que se adapta mejor a cualquier tipo de texto, supone que la distribución de frecuencias es una *ley de potencias*:

$$f = a/r^b$$

en donde b es un exponente cercano a 1.

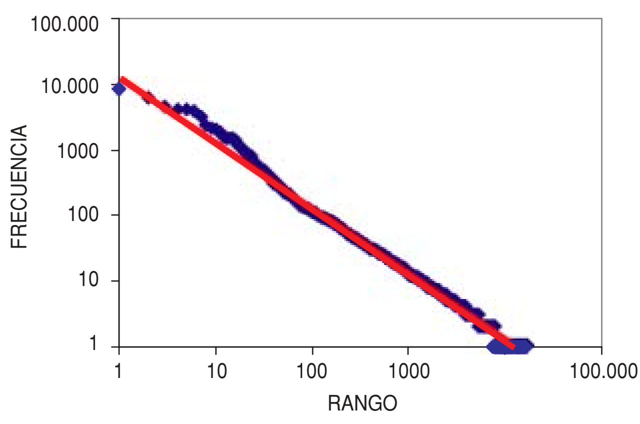
Para ver si un texto satisface la ley de Zipf o su generalización, es necesario construir la lista y representar las frecuencias f de cada palabra en función de su rango r. Sin embargo, es más útil hacer esa representación en *ejes logarítmicos*, es decir, en ejes en donde cada cantidad no varía de unidad en unidad sino en intervalos dados por las distintas potencias de diez. Esta representación equivale a dibujar la gráfica del logaritmo de f frente al logaritmo de r, que se relacionan de la siguiente forma:

$$\log f = \log a - b \log r$$

Como a es una constante, esta ecuación nos dice que la gráfica de $\log f$ en función de $\log r$, o, equivalentemente, la de f en función de r con ejes logarítmicos, será una recta inclinada hacia abajo y con pendiente b.

Veamos si *Cien años de soledad* verifica la ley de Zipf. La novela tiene un total de 138.014 palabras, entre las cuales hay 16.019 diferentes. TextStat realiza una tabla con la frecuencia de cada una de estas 16.019 palabras.

La lista contiene algunas curiosidades y enigmas. Por ejemplo, el artículo femenino "la" aparece significativamente más veces que el masculino "el", mientras que el plural "los" aparece más veces que "las" y el indeterminado "un" aparece más veces que "una". Hay una primera explicación bastante sencilla: "la", a diferencia de "el", no es sólo artículo determinado sino también pronombre. Aun así, la explicación no es completa porque, más abajo en la lista, comprobamos



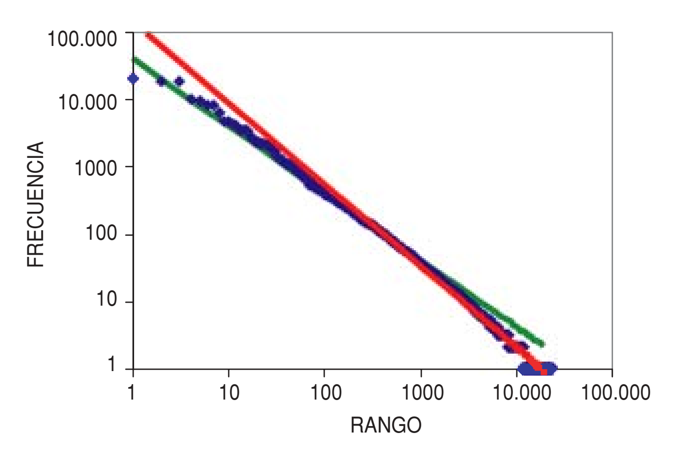
1. La ley de Zipf para Cien años de soledad

que "lo" aparece 888 veces que, sumadas a las 4054 veces de "el", aún se encuentran muy por debajo de las apariciones de "la" (6110). Sigue siendo curioso que los dos artículos indeterminados tengan casi la misma frecuencia, mientras que el plural "unos" sale 42 veces y "unas" sólo 20. Lo mismo ocurre con otros pronombres y adjetivos. Por ejemplo, "ese" sale 75 veces y "esa" 105, mientras que "esos" sale 30 y "esas" sólo 11. "Otro" sale 106, "otra" 93 veces, "otros" 55 y "otras" 21. En los plurales las diferencias siempre son bastante significativas. Se podría pensar que es debido a que en castellano se toma el masculino para plurales en donde hay tanto mujeres como varones, pero, analizando las distintas apariciones de "otros" y "otras", por ejemplo, se puede comprobar que este argumento no da cuenta de la diferencia. En mi opinión, una posible explicación se encuentra en el hecho de que existe un gran número de sustantivos femeninos en castellano que se refieren a cualidades, como "blancura" o "pereza", y cuyo plural es inexistente o muy raro.

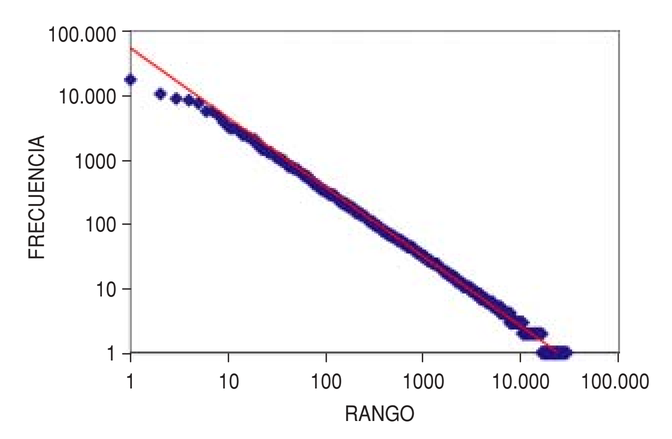
Volviendo a la ley de Zipf, en la figura 1 pueden ver la gráfica de la frecuencia en función del rango. Los puntos azules son las frecuencias de cada palabra en el texto y la línea roja es la recta que mejor se aproxima a los puntos: una ley de potencias con $a = 13.083$ y $b = 1{,}0086$. El exponente b es muy cercano a 1, de modo que podemos decir que la ley de Zipf original se cumple con bastante aproximación en la novela de García Márquez.

En la figura 2 podemos ver la ley de Zipf para *Don Quijote*, en el que hay 22.941 tipos de palabras entre las 381.222 que componen el texto. La línea roja representa de nuevo la ley de potencias que mejor se ajusta a los datos "experimentales" y en este caso es la función $f = 142.271\ r^{-1{,}2136}$, es decir, una ley de potencias con exponente $b = 1{,}2136$. El exponente se aleja significativamente de 1, el exponente de la ley de Zipf original, pero también podemos observar que no reproduce bien el comportamiento de las palabras más frecuentes. He dibujado en verde la ley de Zipf "genuina", es decir, con exponente $b = 1$, que mejor se ajusta a los datos y el resultado no es peor que el de la mejor ley de potencias. Lo que ocurre en este caso es que la ley de Zipf genuina se ajusta bien a los puntos con mayor frecuencia, pero se desvía de los puntos con mayor rango y menor frecuencia. ¿Qué se puede concluir entonces? Yo diría que ni la ley de Zipf ni la de potencias se ajustan a los datos de *El Quijote*. Aunque las palabras más frecuentes sí cumplen aquélla, parece haber un número demasiado pequeño de palabras "raras", es decir, de palabras que aparecen sólo una vez. Esta escasez hace que al ajustar una ley de potencias, ésta se incline en exceso y no pueda dar cuenta de modo preciso del comportamiento de las palabras más frecuentes.

Para ver la universalidad de la ley de Zipf, les presento el análisis del original en inglés del *Ulysses* de James Joyce. A pesar de ser una novela en donde hay una mayor experimentación con el lenguaje, los datos se ajustan bastante bien a la ley de Zipf. Frecuencia y rango están relacionados por una ley de potencias



2. Ley de Zipf para el Quijote. *La línea roja es la ley de potencia que mejor se ajusta a los datos* (puntos azules), *mientras que la línea verde es una ley de Zipf "genuina" con exponente* b = *1*



3. La ley de Zipf para el original en inglés del Ulysses *de Joyce*

con $a = 52.467$ y exponente $b = 1{,}0793$, aunque se observa una desviación con respecto a la ley en las palabras más frecuentes.

Zipf introdujo su ley en 1949, en un libro titulado *El comportamiento humano y la ley del mínimo esfuerzo*. La razón de este título es que la ley puede derivarse suponiendo que el lenguaje natural se ha desarrollado de modo que transmita la mayor cantidad de información con el menor número de palabras. Benoit Mandelbrot también realizó en 1951 una demostración similar. Sin embargo, ambas demostraciones implican una relación entre el rango de la palabra y su longitud, de modo que las palabras más frecuentes son las más cortas. Esta relación es cierta, como se ve en el caso de *Cien años de Soledad*, cuyas palabras más frecuentes son de una o dos sílabas, pero deja de cumplirse para palabras de mayor rango.

Otra herramienta que sin duda atraerá al curioso por el lenguaje es la consulta del corpus diacrónico de la Real Academia Española, que puede realizarse por Internet (www.rae.es, Consulta Banco de datos) y en el que se pueden buscar palabras y expresiones y observar su utilización desde el origen de nuestra lengua hasta nuestros días.

IDEAS APLICADAS

Mark Fischetti

Impresión por chorro de tinta

Quien quiera ver en acción una maravilla de la micromecánica, que se fije en el interior de una impresora de chorro de tinta. Los entresijos fundamentales son mecánicos: un motor gradual hace girar una correa, que mueve el grupo de impresión en vaivén de un lado al otro de la página en impresión. El grupo de impresión comprende los cartuchos de tinta. Las instrucciones acerca de la impresión se envían a través de una banda de conductores que se dobla acompañando al movimiento del grupo. Ahí entra en juego el mundo de lo microscópico.

En las impresoras piezoeléctricas (Epson) el grupo de impresión lleva un cabezal de impresión fijo y el cartucho se limita a suministrar tinta. El cabezal aplica una corriente eléctrica a unos cristales vibratorios, cuyo movimiento impulsa la salida de minúsculas gotas de tinta por unas boquillas diminutas. En las impresoras de chorro térmicas, o de "burbuja a chorro" (Canon, Hewlett-Packard), el cabezal está dentro del cartucho de tinta, que incluye toda la microtecnología y un circuito integrado; un alarde técnico por 30 euros. El cabezal sobrecalienta la tinta de modo que la burbuja de vapor explosiva que se crea descargue una gotita por una boquilla. En ambos modelos, el cabezal dispara de 55 a 95 chorros en menos de un centímetro cuadrado. Cada chorro tiene su propio conducto de tinta, que lo alimenta, y su propia resistencia o cristal, que lo lanza muchas veces por segundo. Los dispositivos de este tipo son auténticos sistemas microelectromecánicos, de los que hoy se habla mucho, pero que ya se aplicaban en estas máquinas hace casi veinte años.

Un chorro puede colocar una gotita en cualquier punto de una página con una precisión del orden de las micras. La mancha correspondiente tiene una sección transversal del orden de un cuarto a un décimo del grueso de un cabello humano. Las manchas se agrupan con una resolución de hasta 1900 por 500 en un centímetro cuadrado de papel de alta calidad.

Las impresoras de chorro de tinta se han abaratado tanto que dejan un margen muy estrecho, pero los fabricantes hacen su agosto con los cartuchos. Según Frank L. Cloutier, de Hewlett-Packard, los cabezales son tan depurados que nuevos refinamientos quizá no mejorarían la resolución de modo perceptible para el ojo humano. Por tanto, sostiene, el futuro se halla en la calidad de las tintas. La máxima prioridad se asigna a compuestos de secado más rápido una vez depositados sobre el papel, pero que no se sequen en la boquilla ni se desvanezcan luego; proporcionarán una mejor densidad de píxeles e impresiones más veloces de imágenes de calidad fotográfica.



1. EN UNA IMPRESORA TERMICA DE CHORRO DE TINTA, el cartucho de tinta contiene el cabezal impresor, que forma las letras y los píxeles lanzando a la vez una multitud de gotitas. La máquina envía las instrucciones de lanzamiento a través de contactos de direccionamiento a un circuito integrado que constituye el reverso del cabezal. Cada chorro dispone de un transistor que le informa de cuándo debe lanzar una gotita de cuatro picolitros hacia el papel.





2. LOS CABEZALES TERMICOS generan un impulso de tensión eléctrica de corta duración que calienta una resistencia de película delgada de tantalio y aluminio; su espesor es de sólo 100 átomos. Esa resistencia sobrecalienta la tinta hasta 300 grados en menos de una millonésima de segundo. Las moléculas de tinta se vaporizan y forman una burbuja que se hincha y fuerza la salida de una gotita de tinta por la boquilla. Para entonces la película ya se ha enfriado y la burbuja se deshace, creando un vacío que extrae más tinta del depósito por efecto capilar.

DANIELS & DANIELS; FUENTE: NIELS NIELSEN *Hewlett-Packard (inserto)*

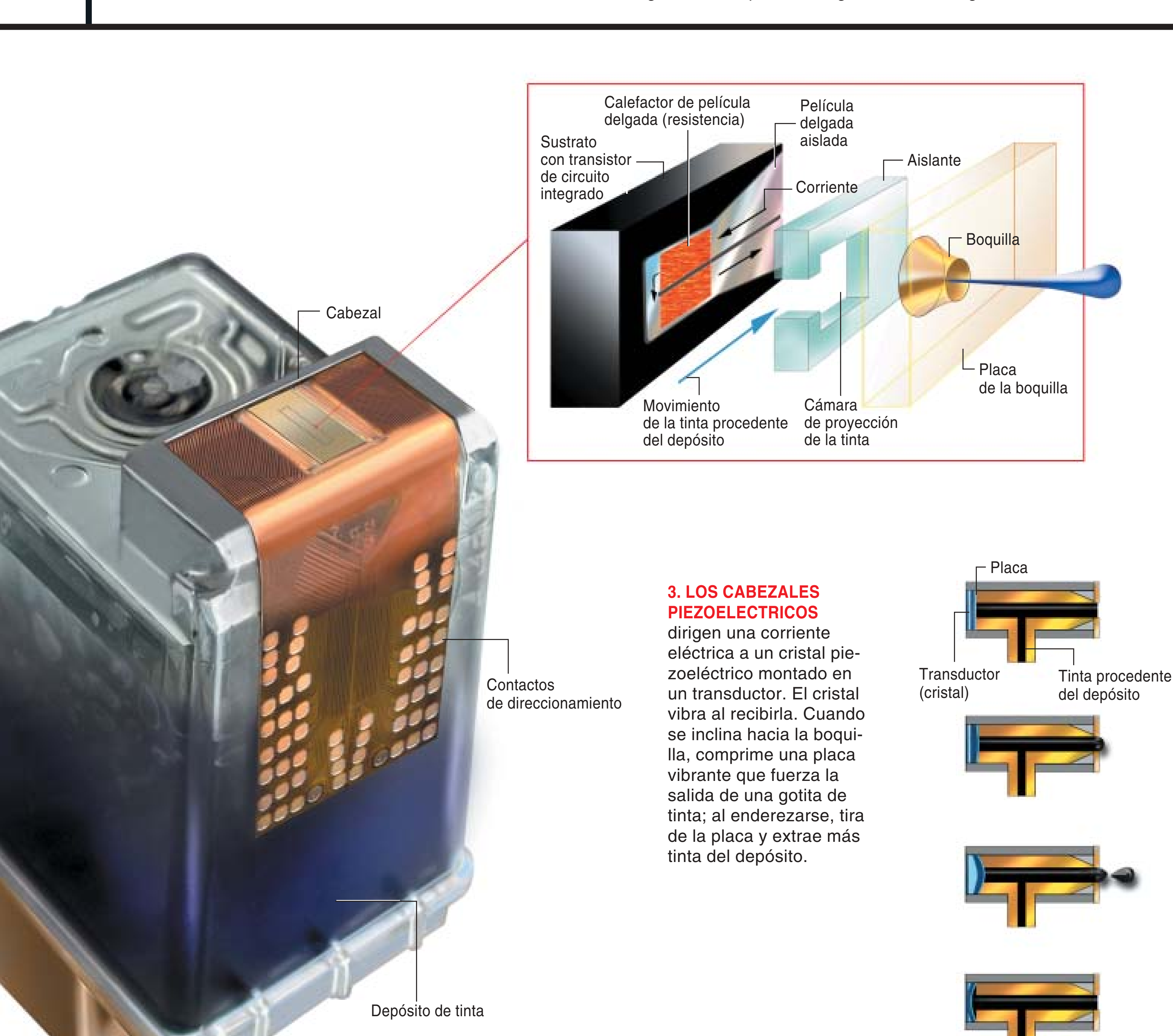
¿SABIA USTED QUE...?

➤ RENACUAJOS: Llaman así a las impresoras de chorro de tinta porque cada gotita que sale por una boquilla de proyección se asemeja, como muestra la fotografía de alta velocidad, a un renacuajo o a un espermatozoide —una cabeza seguida de una cola, tal y como se representa aquí abajo—. La tensión superficial hace que la gotita tarde en desprenderse del depósito; se alarga por ello. Cuando la cola se suelta, las fuerzas estáticas la devuelven a la cabeza justo cuando ésta incide en el papel.

➤ IMITACIONES: Hay fabricantes de cartuchos genéricos de tinta para impresoras piezoeléctricas de marca; moldean como corresponda los cartuchos y los rellenan de tinta. Con los cartuchos térmicos, como contienen un cabezal complicado (y patentado), se limitan a rellenar los cartuchos originales, vacíos o reciclados.

➤ IMAGEN DE PAPEL: Cuando una gotita de tinta incide en papel no revestido, o "natural", la absorben, por debajo de la superficie de la hoja, las fibras orientadas al azar del papel. Esto hace que el "punto" se ramifique en forma de mancha asimétrica. El papel revestido está acabado con una película cerosa que retiene la tinta en la fina capa superficial; de esa manera se forma un círculo bien definido. La reducción de la "florescencia" entre puntos mejora la resolución de la impresión. Los mejores revestimientos —sobre papel del llamado fotográfico— reducen al máximo la florescencia y optimizan la resolución.

➤ COLORES: En las impresoras se emplean tintas de los mismos colores que en las prensas de imprimir: cian, magenta, amarillo y negro. Las máquinas más caras añaden cian y magenta claros para conseguir matices fotográficos.



3. LOS CABEZALES PIEZOELECTRICOS dirigen una corriente eléctrica a un cristal piezoeléctrico montado en un transductor. El cristal vibra al recibirla. Cuando se inclina hacia la boquilla, comprime una placa vibrante que fuerza la salida de una gotita de tinta; al enderezarse, tira de la placa y extrae más tinta del depósito.

LIBROS

Filosofía natural

En el Renacimiento

THE DYNAMICS OF ARISTOTELIAN NATURAL PHILOSOPHY FROM ANTIQUITY TO THE SEVENTEENTH CENTURY. Dirigido por Cees Leijenhorst, Christoph Lüthy y Johannes M. M. H. Thijssen. Brill; Leiden, 2002. **LOGIC, SIGNS AND NATURE IN THE RENAISSANCE,** por Ian Maclean. Cambridge University Press; Cambridge, 2002. **SECRETS OF NATURE. ASTROLOGY AND ALCHEMY IN EARLY MODERN EUROPE.** Dirigido por William R. Newman y Anthony Grafton. The MIT Press; Cambridge, 2001.

THE UNIVERSITIES OF THE ITALIAN RENAISSANCE, por Paul F. Grendler. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 2002.

OSWALDUS CROLLIUS. ALCHEMOMEDIZINISCHE BRIEFE 1585 BIS 1597. Edición, traducción y comentarios de Wilhelm Kühlmann y Joachim Telle. Franz Steiner Verlag Stuttgart, 1998. **DE FIGURA UMANA. FISIOGNOMICA, ANATOMIA E ARTE IN LEONARDO,** por Domenico Laurenza. Leo S. Olschki; Florencia, 2001.

DODONAEUS IN JAPAN. TRANSLATION AND THE SCIENTIFIC MIND IN THE TOKUGAWA PERIOD. Dirigido por W. F. Vande Walle. Co-editor Kazubiko Kasaya. Leuven University Press; Lovaina, 2001. **OSSERVAZIONE DI COSE STRAORDINARIE. IL DE OBSERVATIONE FOETUS IN OVIS (1564) DI ULISSE ALDROVANDI,** por Sandra Tugnoli Pàttaro. CLUEB; Bolonia, 2000.

El pensamiento científico del Renacimiento procede sobre una triple vía. De ese trío, hay dos sistemas, filosofía natural aristotélica y teoría humoral galénica, que encarnan el saber aceptado (*The Dynamics of Aristotelian Natural Philosophy from Antiquity to the Seventeenth Century* y *Logic, Signs and Nature in the Renaissance*). El tercer raíl —el de la astrología y la alquimia— se movió en la frontera entre lo admitido y lo reprobado (*Secrets of Nature. Astrology and Alchemy in Early Modern Europe*).

La doctrina científica de Aristóteles se desarrolla en los *libri naturales*, que exponen los principios constitutivos y la función de estrellas, minerales, almas, plantas, elementos y animales, junto con los procesos mentales a través de los cuales llegamos a su conocimiento. ¿Persistió esta filosofía natural como un todo coherente y unívoco en el legado intelectual de Occidente? En absoluto, se afirma desde las diversas perspectivas en que se sitúan los reunidos en un congreso reciente sobre *The Dynamics of Aristotelian Natural Philosophy from Antiquity to the Seventeenth Century*, cuyas ponencias se recogen en la obra del mismo título. Rechazan que el aristotelismo haya sido una doctrina uniforme a lo largo de la historia, como niegan también que puedan escalonarse por épocas las principales tendencias de su filosofía natural.

Incluso en los momentos medievales de mayor cohesión, en que se enseñan *ad litteram* los libros del estagirita, se expresan interpretaciones muy dispares y a veces contradictorias. No es lo mismo el aristotelismo de Averroes que el de Alberto Magno, ni el de Guillermo de Ockam igual que el de Juan de Buridán. La proliferación de interpretaciones rivales se acentúa con el redescubrimiento de los comentaristas helenistas, teñidos de influencias platónicas, y la introducción de nuevas herramientas analíticas durante el Renacimiento. Incluso entrados en el siglo XVII, muchos de los que se levantan contra la filosofía natural aristotélica dependen, sin embargo, en su lenguaje y semántica del denostado. Hubo en los albores de la edad moderna quienes estaban dispuestos a admitir las nuevas tesis de Galileo y Descartes, si pudieran articularse en un sistema vertebrado. Consonante con la reforma de los planes de estudios de los jesuitas, se asiste a un empeño por integrar la cosmología de Tyco, la cinemática de Galileo, la dinámica de Newton y otros ingredientes en la filosofía natural recibida.

Giovanni Manardo representa en la primera mitad del siglo XVI la asimilación crítica de los clásicos médicos, impulsada por Niccolò Leoniceno. Crítica significa aquí pasada por el tamiz del análisis lógico y el contexto histórico. En su exégesis del *Ars medica* de Galeno, Manardo trae a primer plano los problemas hermenéuticos que plantea. Por ejemplo, la aparente aceptación de la existencia del cuerpo neutro, intermedio entre sano y enfermo. Se trata, razona Manardo, de un elemento extraño a la teoría humoral que Galeno habría tomado prestado de Herófilo de Alejandría, pero agregado como pura mención: Galeno no incluye nunca una tercera condición corporal. A los clásicos, viene a decirse, hemos de leerlos en su contexto histórico.

La cuestión del *neutrum* refleja, además, un debate más profundo sobre las relaciones entre filosofía natural y medicina en el Renacimiento, en particular la subordinación de la segunda a la primera. Aristóteles se había ocupado de la jerarquización de las ciencias en los *Analíticos posteriores*. También en el *De sensu et sensato* declara a la filosofía natural fundamento de la medicina. En torno a esos y otros textos polemizarán los profesores de la influyente Universidad de Padua (Zabarella y Piccolomini).

Si Padua sentaba cátedra para el resto de los centros de la península, las universidades italianas marcaban el ritmo del saber de su tiempo. Sobre su estructura, funcionamiento y docencia, acaba de publicar Paul F. Grendler un libro

espléndido (*The Universities of the Italian Renaissance*). No sólo repasa el origen y desarrollo de cada universidad, número de profesores y su distribución por disciplinas, matriculación de los alumnos, miembros famosos de la facultad, presupuesto y salarios, horarios de clases, vida estudiantil, alumnos extranjeros o doctorado, sino que hilvana también esa información para mostrar el cambio operado en anatomía y botánica médica, neoaristotelismo e innovación matemática.

La universidad nació en la Edad Media. A la fundación de la de Bolonia, en la segunda mitad del siglo XII, siguieron, entre 1222 y 1308, las de Padua, Nápoles, Siena, Roma y Perugia. De mediados del siglo XIV a mediados del siglo XV se crearon las de Pisa, Florencia, Pavía, Ferrara, Turín y Catania. Por fin, entre 1540 y 1601 se erigieron las de Macerata, Salerno, Messina y Parma. La universidad del Renacimiento cumplía una triple misión: fomentaba la investigación, formaba a futuros profesionales y concedía grados que capacitaban al doctorado para enseñar en cualquier universidad de la Cristiandad. La institución, establecida por el Pontífice, el emperador o el municipio, ofrecía instrucción superior en artes, leyes, medicina y, a veces, en teología.



Universidades italianas del Renacimiento y fecha de su fundación

A la educación médica en el Renacimiento consagra Ian Maclean el libro de referencia. Constituye ese período del humanismo médico un siglo de estabilidad lingüística (con el latín como idioma académico), de consolidación y de continuidad textual, de conciliación (primero de la tradición medieval con la nueva medicina griega, más tarde del galenismo con el paracelsismo) y de importancia creciente de la semiología. Se extiende hasta 1630, cuando la Guerra de los Treinta Años corta la costumbre fructífera de la *peregrinatio medica* por las universidades de mayor prestigio (Padua, Ferrara, Montpellier).

Hasta el año 1500 se seguían imprimiendo manuales tradicionales —la *Articella*, el *Conciliator* de Pietro d'Abano y el *Canon* de Avicena—, que compondrán el núcleo de la enseñanza en las aulas universitarias otros cien años. Coexisten con epítomes más recientes, como el de Michaele Savonarola, que cubre desde la patología hasta la prognosis. Por su lado, la recuperación de los estudios platónicos y neoplatónicos en el siglo XV repercutió en la influencia de lo supralunar sobre lo sublunar. Sin solución de continuidad se suceden las ediciones de los clásicos. La difusión del tratado hipocrático sobre ginecología inspiró la primera colección de textos específicamente dedicados a la mujer.

La evolución de la medicina en el siglo XVI va unida a las aportaciones de un plantel de figuras innovadoras, de las que Andrés Vesalio en anatomía y Girolamo Fracastoro con su teoría del contagio han pasado al acervo común de la cultura. Por lo que concierne al galenismo que se remoza, se asiste a una primera fase de recuperación, traducción y comentario de los textos de Galeno (la edición de 1525 contenía 106 textos en total, de los cuales 46 desconocidos en Occidente), que se extiende hasta 1550. Pero los nuevos descubrimientos anatómicos, quirúrgicos y farmacológicos van menoscabando su autoridad en la segunda mitad del siglo, para disolverse en las corrientes mecanicistas de la centuria siguiente. El azote de la sífilis y otras patologías acabaron con la vieja creencia de que, en medicina, Hipócrates lo descubrió todo, dejándose para Galeno la explicación última. La verdad podría hallarse escondida, además, en otros terrenos desatendidos por la academia, como la alquimia o la magia natural.

Poco a poco van perdiendo el aura de marginalidad que se les suponía a esas disciplinas, exponen William R. Newman y Anthony Grafton en

la presentación de *Secrets of Nature*. Así, la astrología renacentista constituía una herramienta más para abordar problemas especulativos y prácticos. Abarcaba un cuerpo coherente de prácticas que gozaban de respaldo oficial y social. Por su parte, lo primordial de la alquimia no residiría en un empeño mistérico, prejuicio creado por los positivistas del siglo XIX, sino en una explicación racional, que a menudo se consideraba par con la medicina.

Aunque abundan los testimonios de los vínculos entre astrología y alquimia, no siempre convergían. Los astrólogos renacentistas levantaban cartas astrales y tabulaban el nacimiento, vida y sino de las personas principales. Aconsejaban, de acuerdo con los movimientos de planetas y constelaciones, sobre matrimonios, viajes, declaraciones de guerra e inversiones. Inspiraron algunas de las obras más bellas del Renacimiento, desde los frescos del Palazzo Schifanoia de Ferrara hasta la *Melencolia* de Albert Durero. Tal era su aceptación, que los protagonistas de la Revolución Científica se sumaron a la producción de pronósticos y almanaques. Kepler se aplicó incluso a depurar las tabulaciones. Continuaba, diríase, una tradición que se remontaba a Claudio Ptolomeo, para quien la astronomía predecía las posiciones de los planetas, en tanto que la astrología predecía sus efectos sobre la tierra. El astrólogo no quería que se le confundiera con el charlatán. En sus horóscopos y presagios se sirve, cuando de un asunto médico se trata, de la doctrina hipocrática o paracelsista, según el caso. Cardano, astrólogo reconocido con su comentario al *Quadripartitum* de Ptolomeo y médico famoso, procuraba, sin embargo, no mezclarlas en la llamada medicina astrológica.



Studio (c. 1478), de Leonardo

En 1564, John Dee publicaba su *Monas hieroglyphica*. Afirmaba allí que el signo astrológico de Mercurio podría formar la base de un nuevo lenguaje científico en el que la alquimia ocupara un lugar preeminente. Dee combinaba una astrología reformada por la filosofía natural y la óptica, con una alquimia renovada por Agrippa von Nettesheim y Paracelso, es decir, asociada al arte de los metales. Todavía en 1652, uno de los fundadores de la Regia Sociedad, Elias Ashmole, exponía en su *Theatrum chemicum britannicum* que la parte operativa de la alquimia debía ajustarse a las reglas de la astronomía y la astrología.

Cierto es que Paracelso propugnaba un empirismo radical, que su estilo era más homilético que expositor, exento de un sistema racional riguroso. Incluso los tres principios fundamentales de su doctrina médica (azufre, sal y mercurio) sólo pueden extraerse con dificultad de sus escritos, que no empezaron a influir hasta su traducción latina en la segunda mitad del siglo XVI. Y la tenaz labor de Crollius (*Alchemomedizinische Briefe*). A Oswald Crollius (1560-1608), autor de *Basilica Chymica*, se le reconoce el mérito de haber puesto las bases de la quimiatría. Había estudiado medicina en Marburg, Gante, Estrasburgo y Heidelberg. En su *peregrinatio* académica no faltó la visita obligada a Padua. Del epistolario aquí reunido revisten notable interés para la historia de la ciencia las misivas dirigidas a Joseph Duchesne (aplicación del oro, del antimonio) y, sobre todo, a Franz Kretschmer (sobre la praxis paracelsista). Desde 1593 ejerció en Polonia, Silesia, Hungría, Bohemia. De Paracelso toma la teoría del tártaro como causa general de enfermedad y acepta la idea de "archaeus" como principio

Economía y política en Bolivia

DR. MORITZ (DON MAURICIO) HOCHSCHILD 1881-1965. THE MAN AND HIS COMPANIES. A GERMAN JEWISH MINING ENTREPRENEUR IN SOUTH AMERICA, por Helmut Waszkis. Vervuert-Iberoamericana; Frankfurt am Main y Madrid, 2001.

En los países en desarrollo escasea la capacidad empresarial. Como en ellos a veces abundan recursos naturales sin explotar, es lógico que haya un transvase de esa capacidad desde los países desarrollados. Hoy son las multinacionales las que hacen principalmente esa labor, pero antaño eran empresarios individuales o empresas no muy grandes. Esa actividad fue y sigue siendo criticada, aunque resulta beneficiosa cuando se aportan conocimientos, tecnología y espíritu empresarial y cuando se crea riqueza, siempre, claro es, que una parte apreciable de ella quede en el país.

Entre los empresarios que en la primera mitad del siglo XX se expatriaron de su país figura el ingeniero alemán Moritz Hochschild, conocido como don Mauricio en los países de habla española donde trabajó. Formado en una de las mejores escuelas de minas de su tiempo, tras probar suerte, al parecer con poca fortuna, en España —durante unos meses— y en Australia —durante unos años— se estableció en Sudamérica donde se dedicó con éxito a la extracción y comercio de minerales metálicos.

Su peripecia empresarial es la que se nos cuenta en este libro. Tal como queda patente en las 500 notas de pie de página que acompañan al texto, se trata de una obra escrita con mucho rigor y tras una consulta exhaustiva de las fuentes disponibles en media docena de países, incluidos testimonios orales de coetáneos del biografiado.

El protagonista no fue un personaje de primerísima fila —aunque tuvo fama de ser uno de los hombres más ricos de su tiempo, lo que, según parece, distaba mucho de ser cierto— y tampoco el primer empresario minero de Bolivia, país donde desempeñó el grueso de sus actividades. Las empresas que creó no sobrevivieron muchos años a la muerte, en 1965, de su fundador. No siempre existe documentación sobre lo que hizo, con lo que hay que rellenar lagunas con conjeturas, cosa que hace el autor con prudencia y discernimiento.

Con todo, la obra es una aportación muy interesante a la historia de Bolivia y también a la historia empresarial, rama ésta de la economía que hoy se halla en pleno auge.

La historia económica de Bolivia no es muy brillante, ya que hoy en día, transcurridos casi dos siglos desde la independencia, sigue siendo un país de ingreso bajo, con una renta por habitante ocho veces inferior a la de España en paridad de poder adquisitivo. Es fácil imaginar, por tanto, las dificultades con que tropezó nuestro empresario hace ochenta años: falta de capitales, infraestructuras deficientes, mano de obra poco formada, demanda interior escasa, —aspecto éste que obligaba casi siempre a vender el mineral en bruto en el extranjero— legislación variable sobre derechos de propiedad, administraciones públicas poco eficaces y corruptas.

En cuanto a la historia política, la de un país atrasado suele ser muy agitada, pues pobreza y desigualdad engendran tensiones sociales y una intervención casi constante de las fuerzas armadas en la vida pública. Tal como demuestra, por cierto, entre otros muchos casos, la historia de España hasta bien avanzado el siglo XX.

Un empresario en un país políticamente inestable afronta así más dificultades que las que entraña un oficio que ya de suyo es arduo. Las empresas bolivianas de don Mauricio fueron expropiadas en 1952, junto con las principales minas de estaño del país. El empresario recibió como indemnización unos cinco millones de dólares de entonces, lo que supuso, probablemente, la cuarta o quinta parte del valor real de sus yacimientos. Claro que por aquel entonces dice el autor que esos yacimientos representaban tan sólo del orden de la mitad del patrimonio que Hochschild tenía repartidos por varios países, entre ellos, Brasil, Chile y Perú.

Otro episodio, éste muy rocambolesco, pero que pudo tener consecuencias funestas para nuestro empresario se produjo años antes. En 1939, acusado de alta traición por haber difundido un memorando donde criticaba unas leyes mineras intervencionistas, fue condenado a muerte, nada menos que en Consejo de Ministros, por instigación del Presidente del país, Germán Busch. Este, hombre muy exaltado que se suicidaría dos meses después, propuso que el empresario fuera fusilado al día siguiente e incluso llegó a dar las órdenes oportunas. Afortunadamente para don Mauricio, el criterio más sensato de una mayoría de ministros prevaleció y en el mismo Consejo se anuló la sentencia.

El único pero que podría ponerse a este libro tan completo sería el relativo a las cuentas de las empresas de Hochschild en Sudamérica y, en particular, en Bolivia. ¿Cuánta de la riqueza que extrajo de las minas quedó en los países donde se estableció, en forma de impuestos, reinversiones, tecnología, sueldos y salarios y demás? El autor no tiene la culpa de que no se conozca tal cosa, pues simplemente no existe documentación sobre el particular. Los archivos de empresas desaparecidas suelen desvanecerse con ellas, incluso cuando se conservaban hasta entonces. Con suerte, sólo subsiste algún que otro documento por aquí y por allá.

Queda así en el aire una pregunta fundamental. ¿Cuánto aportó a Bolivia la actividad empresarial de don Mauricio? Si tuviésemos respuesta podríamos hacer un juicio cabal sobre un episodio, en todo caso notable, de la historia empresarial de un país en desarrollo.

—FRANCISCO BUSTELO

operativo de la separación entre lo puro e impuro de la naturaleza. Describe el acetato de calcio ("sal corallorum"). Crollius defendió también la teoría de las signaturas en el tratado *De signaturis internis rerum*. En su marco, las plantas y minerales presentaban semejanzas con órganos o partes del cuerpo que denotaban una indicación terapéutica posible.

La idea de las signaturas se inscribía en el mundo abigarrado y evanescente de las formas, que hallaba otra vía de expresión en la teoría fisiognómica (*De Figura Umana*). Leonardo dejó escritos algunos apuntes importantes de fisiognómica (el estudio de la forma externa del cuerpo como manifestación del carácter). Con buen criterio, Laurenza presenta primero la relación entre fisiognomía y anatomía y, luego, su manifestación plástica. Entendía Leonardo que



Ejemplo del alquimista que recurre a la astrología en el umbral del Renacimiento. Se trata del Ordinall of Alchimy*, de Thomas Norton (1433-1513/14), de Bristol. Contiene esta sorprendente ilustración de cuatro opciones alquímicas para acometer operaciones diferentes. Los cuatro esquemas opcionales están construidos para una latitud de unos 52 grados N, una buena aproximación de Bristol. Los cuatro esquemas electivos concuerdan en situar el ascendente en Sagitario*

la *filosomía* (fisiognomía) constituía un elemento de la complexión del hombre adulto, que se integraba en el mismo todo que venas, nervios, músculos y huesos. De ahí que su tratado no sea de mera "anatomía", sino de *figura humana*, vale decir, el cuerpo del otro tal como nosotros lo vemos. Al convertirla en título evidencia que quiere ocuparse de las causas *internas* de la figura, que son siempre dobles: orgánicas y anímicas. En sus dibujos de juventud, de 1478, encontramos ya trazas de reflexiones fisiognómicas. Once años más tarde, esa tendencia se hace patente en los estudios de cráneos. El perfil geométrico, poligonal, se humaniza. Se construye desde el interior.

Del saber médico transmitido por las universidades renacentistas comenzó pronto a desgajarse la historia natural. Para ejemplificar ese empeño podemos ceñirnos a un botánico, Dodoens (*Dodonaeus in Japan. Translation and the Scientific Mind in the Tokugawa Period*), y un zoólogo, Aldrovandi (*Osservazione di cose straordinarie*). Los primeros pasos de la botánica renacentista de los Países Bajos se dieron sobre las huellas de la fitografía alemana inmediatamente precedente. Al prescindir en buena medida del dictado dioscorídeo aceleran el tránsito de la materia médica a la investigación vegetal por sí misma. Rembertus Dodonaeus (1516/17-1585) se matriculó, a los 13 años, en la Universidad de Lovaina, donde estudió cosmografía (con Gemma Frisius), fisiología y medicina. En esta última se doctoró en 1535. Emprendió luego el peregrinaje acostumbrado por diversas universidades de Italia, Francia y Alemania. De vuelta a Malinas, sustituye a su padre al frente de la medicina municipal. De 1574 a 1577, y mediante la intervención de Clusius, ejerció la profesión en la corte del emperador Maximiliano II y su sucesor Rodolfo II. Pero declinó el ofrecimiento de una cátedra en la Universidad de Lovaina, como también, en 1578, la invitación de convertirse en médico de cámara de Felipe II. Sí aceptó el nombramiento que le propuso la Universidad de Leiden.

De acuerdo con las indicaciones del impresor, Van der Loe, que había comprado las planchas del *De historia stirpium* de Fuchs, Dodoens pergeñó el *Cruijdeboeck*, su primera obra importante, a modo de adaptación holandesa del mismo. Pero superó el trabajo del maestro de Tubinga en el planteamiento teórico de su ordenación, en el número de plantas y en la información aportada en las descripciones. Fuchs dispuso las especies por orden alfabético; Dodoens las distribuyó según un criterio sistemático. El *Cruijdeboeck* consta de seis partes: contiene la primera un número de plantas que no guardan relación entre sí; la segunda congrega flores y hierbas odoríferas; se dedica la tercera a las plantas medicinales y dañinas; la cuarta a los cereales,

hortalizas y forrajes; aborda en la parte quinta las hierbas, raíces y frutos que se emplean en cocina, mientras que la sexta y última parte presenta descripciones de árboles y otras plantas leñosas. Esta obra volvió a publicarse revisada y enriquecida en 1563.

Corona su investigación botánica, que ha ido divulgado en numerosos escritos monográficos, con la publicación en 1583 de sus espléndidos *Stirpium historiae pemptades sex. Sive libri XXX*, cuyo uso perduró hasta el siglo XIX. Del *Cruijdeboeck* aquí hay un largo trecho de evolución personal. No es el imitador de Fuchs o Tragus. Se ha convertido ya en un botánico experto, familiarizado con herbarios y jardines que menudeaban en los Países Bajos meridionales, amén de sus frecuentes excursiones que le permitieron describir las especies en su asociación con el medio y entre sí. Como indica el propio nombre cada *pemptas* consta de cinco libros. Versa la primera, con una introducción, sobre plantas misceláneas, sin un encaje en ninguna de sus clases; la segunda describe las plantas odoríferas y umbelíferas; a las hierbas medicinales consagra la tercera; la cuarta aborda cereales, plantas leguminosas, plantas acuáticas y propias de humedales; la quinta se extiende con las hortalizas; la sexta, con plantas que echan fruto y los árboles. En total, forman 26 grupos de plantas. Se ilustran con no menos de 1306 grabados. Aporta la denominación del vegetal en numerosos idiomas: flamenco, alemán, bohemio, húngaro, esloveno, croata, francés, inglés, italiano, español, árabe, latín, griego, hindú y otras lenguas. Indica las características morfológicas y habitus ("forma et figura"). Con ese rigor en la nomenclatura y en la agrupación pudo introducir cierto orden, aun cuando a primera vista nos parezca una clasificación caótica.

Lo que no pudo sospechar era la influencia que esta obra iba a ejercer en el despegue botánico del Japón, siglo y medio más tarde. La materia médica japonesa dependía hasta entonces de la china. Pero en 1717 el shogun Yoshimune mandó estudiar la obra de Dodoens, que serviría de modelo para describir la flora nacional, que difería de la continental china. Se repetía lo que aconteció en la Europa renacentista: si entonces Dioscórides no servía para explicar las plantas de Alemania o los Países Bajos, ahora los nipones caían en la cuenta de las limitaciones de los herbarios chinos.

Prototipo del saber enciclopédico que anhelaba el hombre del Renacimiento fue Ulisse Aldrovandi (1522-1605). No sólo por su *Selva universale delle scienze* o *Pandechion epistemonicon*, obra en 83 volúmenes terminada en 1589, que constituye una suerte de diccionario alfabético de las materias más dispares, sino también por sus libros de historia natural, en particular, por su imponente tratado de zoología. Todo en él era ciclópeo. En la Biblioteca Universitaria de Bolonia se conservan 360 volúmenes manuscritos inéditos (sobre moral, política, matemática, filosofía, lógica, teología, derecho, biblioteconomía, metafísica, ciencias naturales y medicina), 2832 pinturas de tema naturalista principalmente, 16 cajas de herbario, 3454 matrices xilográficas preparadas para la impresión de sus obras y cerca de 4000 volúmenes de su biblioteca.

Recién titulado, ingresa en el Colegio de Médicos de su ciudad, si bien nunca ejerció el arte ni enseñó medicina. Comienza a dar clases de lógica en 1554, obtiene luego la cátedra de filosofía (de 1554 a 1561), docencia que comparte con la "extraordinaria" de "simplicibus" (1556-1561), y en 1561 ocupa la primera cátedra de "Philosophia naturalis de fossilibus, plantis et animalibus", que desempeña hasta su retiro en 1600. Se sirvió de los propios apuntes de Ghini, auténtico motor de la botánica italiana de los años centrales del siglo XVI, para sus clases y demostraciones en el jardín botánico de Bolonia.

Sólo en el ocaso de su vida, a los 77 años, se decidió llevar a la imprenta su obra magna sobre los animales. Pudo ver la publicación de *Ornithologiae, hoc est de avibus historiae libri XII* (3 vols., 1599, 1600, 1603) *De animalibus insectis* (1602) y quizá, *De reliquis animalibus exanguinibus* (1606). Del resto del tratado, objeto de controversia, se ocuparon sus alumnos y seguidores. Para su confección se valió de los precedentes de Gessner, Rondelet y Belon. Aunque él enriquece los escritos de éstos con las nuevas que no paran de llegar de especies procedentes de América, Africa y la India. Aldrovandi dividía el reino animal en los dos grandes grupos clásicos: animales con sangre y animales sin sangre, subdivididos a su vez. Los animales con sangre podían ser tetrápodos vivíparos, tetrápodos ovíparos, aves, peces y animales acuáticos, serpientes y dragones. Eran animales sin sangre los moluscos, vermes, crustáceos, insectos y zoófitos.

Sandra Tugnoli Pàttaro ha recuperado y editado el *De observatione foetus in ovis*, un manuscrito redactado por Aldrovandi en los meses de mayo y junio de 1564. Hasta entonces, durante tres siglos y medio, la fuente de la embriología aldrovandiana se ceñía a lo expuesto en la *Ornithologiae tomus alter* (1600). El desarrollo embrionario del pollo constituía un tema recurrente entre los naturalistas. Era una manera, indirecta, por supuesto, de abordar la embriogénesis humana y acercarse, siquiera fuera de refilón, al origen de la vida. Por lo que concernía al feto humano se partía del *De natura pueri* hipocrático, así como de los galénicos *De semine* y *De foetum formatione*. Tras sus pasos, mediados el Quinientos, investigaron en el embrión humano Realdo Colombo, Gabriele Falloppia, Bartolomeo Eustachi y Giulio Cesare Aranzio. Sobre la evolución del huevo empollado había dejado páginas muy leídas Aristóteles en el libro VI de la *Historia animalium*. Cuenta Aldriovandi en la *Ornithologia* que siguió durante los días de incubación el desarrollo embrionario, confirmando que Aristóteles tenía razón. En *De observatione foetus* va registrando los cambios diarios. Para Aldrovandi, el semen, y por tanto el origen del pollo, reside en el albumen; la yema serviría de nutrición. El primer órgano que se forma, y el más importante para el individuo, es el corazón; atribuye al hígado una función hemopoyética y distingue hasta cinco membranas embrionarias.

—LUIS ALONSO

Aventuras problemáticas

Dennis E. Shasha

Contra las filtraciones

El director de una agencia gubernamental comparte informaciones de carácter confidencial con nueve consejeros. Mas, para gran disgusto suyo, últimamente algunas de sus consideraciones más reservadas han estado apareciendo en la prensa al día siguiente de haberlas revelado en el Consejo. Una técnica típica para descubrir a los indiscretos consiste en proporcionar a cada sospechoso una información exclusiva —un “soplo”— y ver si se difunde. Pero el director descubre que este método no es adecuado, pues los periódicos no publican la noticia si no hay por lo menos tres consejeros que la atestigüen. Por otra parte, el director está completamente seguro de que los “filtradores” no son más de tres.

Se encuentra ante un dilema. Si les proporciona una confidencia a todos, es seguro que será publicada, pero él no habrá avanzado nada. Si sólo se lo dice a una o dos personas, no se publicará. Podría optar por hacerle a cada grupo de tres consejeros un “soplo” diferente, pero como éstos son 9, se podrían formar 84 tríos: demasiados. Opta finalmente por la siguiente estrategia: les irá haciendo confidencias a grupos de 4, a razón de un grupo cada día. En cuanto se produzca la filtración, el número de tríos sospechosos se habrá reducido mucho. Uno de sus objetivos consiste en no provocar más de dos fugas: una de un cuarteto, y otra, de un trío. Otro de sus objetivos consiste en preparar una lista de cuartetos tales que pueda estar seguro de que uno de ellos producirá una filtración, y hacerlo de manera que pueda acertar con el trío de indiscretos sin usar más de 25 soplos. ¿Podría usted ayudarle?

Como ejercicio preliminar, supongamos que el director le hace el primer día una confidencia a los consejeros 1, 2, 3 y 4, sin que se produzca filtración; al día siguiente, les hace una segunda a los consejeros 2, 3, 4 y 5, también sin resultado. Pero, en cambio, la tercera, comunicada a los miembros 1, 2, 4 y 5, sí aparece en los periódicos. ¿Qué tríos son los sospechosos? Solamente dos de los cuatro que podríamos formar con el tercer cuarteto: los 1-2-5 y 1-4-5, pues si alguno de los otros dos tríos estuviera compuesto por filtradores, una de las dos primeras confidencias habría sido publicada. Dado que el director sabe que sólo son tres los indiscretos, le será suficiente poner a prueba a sólo uno de los dos tríos sospechosos restantes.

Tal vez fuera posible que el director lograse descubrir al trío concreto con muchas menos confidencias si en algunas ocasiones diera soplos a más de cuatro personas y estuviera, en cambio, dispuesto a tolerar más de dos filtraciones. ¿Qué le parece a usted?



SARA CHEN

Solución del problema del mes pasado:

Se puede lograr la carambola dirigiendo el tiro hacia el este-nordeste (una pendiente de $1/2$). La bola haría impacto en las posiciones (3, $1/2$) y (2, 1) antes de caer por la tronera. Lo mejor sería consultar las figuras en www.investigacionyciencia.es.

Solución en la Red

Se hallará la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL PROYECTO NANODRIVE, por Peter Vettiger y Gerd Binnig

La invención de un dispositivo perteneciente al dominio de la nanotécnica para producirlo comercialmente y ser utilizado por los consumidores es un proceso más complicado de lo que parece.

EL CRANEO DE TOUMAI, por Kate Wong

Nuevos fósiles polémicos pueden llevar a los científicos más cerca que nunca hasta los orígenes de la humanidad.

NUEVA PIRAMIDE DE LA ALIMENTACION, por Walter C. Willett y Meir J. Stampfer

La guía alimentaria dada diez años atrás ha confundido a mucha gente. Ciertas grasas son sanas para el corazón, mientras que hay numerosos hidratos de carbono dañinos.

INTERACCIONES SISMICAS, por Ross S. Stein

Frente a la concepción predominante, los grandes terremotos pueden interactuar de muchas maneras, algunas inesperadas. Este apasionante descubrimiento podría mejorar nuestra capacidad predictiva de futuros seísmos.

CIENCIA DEL CHAMPAN, por Gérard Liger-Belair

Estudio científico de la efervescencia del champán.

NUEVA LUZ EN LA MEDICINA, por Nick Lane

Pigmentos que se tornan cáusticos al ser expuestos a la luz pueden combatir el cáncer, la ceguera y las cardiopatías.

ESTRUCTURA Y ESTABILIDAD DE LAS PROTEINAS, por Ana Rosa Viguera

En el avance de la proteómica importará descubrir la relación entre las secuencias de aminoácidos, la estructura tridimensional y la función de las proteínas.

EL ARTICO EURASIATICO DURANTE EL ULTIMO PERIODO GLACIAL, por Martin J. Siegert, Julian A. Dowdeswell, John-Inge Svendsen y Anders Elverhøi

Una vasta capa de hielo cubrió en tiempos el mar de Barents. Su brusca desaparición hace 100 centurias proporciona una lección sobre la Antártida Occidental de hoy.

